

В. Т. РЕННЕ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

**Издание третье,
переработанное**



**«ЭНЕРГИЯ»
Ленинградское отделение
1969**

1

2

3

4

5

В книге излагаются сведения об общих свойствах электрических конденсаторов, а также о конструкции, технологии и характеристиках важнейших типов современных конденсаторов. Приводятся данные об основах методики расчета конденсаторов. Даются сведения об основных материалах, применяемых в конденсаторном производстве. Книга рассматривает как конденсаторы постоянной емкости, так и переменные конденсаторы.

Книга предназначена для инженеров-электриков, а также для инженеров других специальностей, имеющих дело с изготовлением или с применением электрических конденсаторов. Кроме того, книга может быть полезна студентам старших курсов электротехнических высших учебных заведений, особенно для специализирующихся в области электроизоляционной техники или радиодеталестроения.

ПРЕДИСЛОВИЕ

К моменту выхода этой книги в свет исполнится 40 лет с того времени, когда автор впервые столкнулся с вопросом об электрических конденсаторах. В то время уже имелась в мировой литературе большая книга по этому вопросу, написанная известным английским специалистом по конденсаторостроению Филиппом Реем Корси (Philip Ray Coursey), ныне уже покойным. В книге имеется обширная библиография по 1927 г., насчитывающая 2012 названий, однако лишь небольшая часть из них представляет ссылки на статьи об электрических конденсаторах (таких статей в то время и за рубежом печаталось мало), остальные ссылки относятся или к патентам или к статьям по электрическим измерениям и другим смежным вопросам. На русском языке не только не было книг по конденсаторам, но и все русские статьи в журналах по этому вопросу можно было сосчитать по пальцам.

Советское конденсаторостроение возникло по существу на голом месте, почти 20 лет спустя после того, как производство конденсаторов началось за рубежом.

За истекшие 40 лет советское конденсаторное производство проделало гигантский путь, развившись в мощную специализированную отрасль промышленности, вышедшую как по своим масштабам, так и по качеству продукции на одно из первых мест в мире.

В настоящее время дать в одной книге все необходимые сведения об электрических конденсаторах совершенно невозможно. Поэтому за последние годы у нас появился ряд книг, подробно рассматривающих отдельные типы конденсаторов, не захватывая проблемы электрического конденсатора в целом.

Несмотря на это автор считает, что и настоящее, третье, издание его книги может быть полезным в качестве своеобразного введения в конденсаторостроение для начинающих конденсаторостроителей или специалистов другого профиля, впервые сталкивающихся с электрическими конденсаторами. Автор надеется, что в этой книге они найдут нужные им сведения об основах теории конденсатора, а также смогут составить представление

об основных особенностях многообразных типов конденсаторов, изготавливаемых современной промышленностью.

Более подробные сведения надо искать в специальных книгах и в журнальных статьях. В связи с этим библиографический список в этом издании книги автор начинает с перечня книг и брошюр по конденсаторам, который он попытался составить, по возможности, полно. Дать полную библиографию по журнальным статьям — задача теперь непосильная для одного человека, да и объем книги этого не позволяет. Поэтому в этом издании автор дает перечень лишь наиболее ценных из известных ему статей начиная с 1959 года; отдельные, ранние публикации, которые автор считает наиболее полезными или даже классическими, указаны в подстрочных примечаниях. Интересующихся другими более ранними изданиями автор отсылает к первому изданию своей книги (ГЭИ, 1952 г.), где приведена библиография статей до 1952 г., и ко второму изданию (ГЭИ, 1959 г.), где указана библиография с 1952 по 1959 гг.

Попытка дать новейшую библиографию по конденсаторам сделана в книге Дэммера и Норденберга, перевод которой вышел и на русском языке; в ней содержится 487 ссылок, преимущественно на статьи на английском языке.

Для того чтобы быть в курсе новейших работ в области электрических конденсаторов, автор настойчиво рекомендует своим читателям пользоваться реферативным журналом «Электротехника и электроэнергетика» (РЖЭ), в котором имеется раздел «Б» (электротехнические материалы, электрические конденсаторы, провода и кабели), выпускаемый отдельным изданием.

Успех, который выпал на долю первых двух изданий настоящей книги, позволяет автору надеяться, что и это, третье, издание будет благосклонно принято читателями, интересующимися электрическими конденсаторами. В этом издании автор попытался отразить те изменения в конденсаторостроении, которые произошли с момента выхода в свет предыдущего издания, а также несколько расширил теоретическую часть, не изменив при этом общего объема книги.

Если эта книга хотя бы в малой степени поможет читателям двигать дальше советское конденсаторостроение или дополнительно расширить применение конденсаторов в советской технике, то автор будет считать свою задачу выполненной.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность рецензенту Л. Н. Закгейму, чьи ценные замечания были очень полезны при подготовке рукописи к печати. Критические замечания по данному третьему изданию автор просит направлять в адрес Ленинградского отделения издательства «Энергия»: Ленинград, Д-41, Марсово поле, д. 1.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Основная терминология и обозначения конденсаторов в схемах

Ранее электрическим конденсатором называли систему из двух или более проводников (обкладок), разделенных диэлектриком, предназначенную для использования ее электрической емкости. Применяя это название теперь, надо иметь в виду, что в качестве обкладки в современных конденсаторах может быть использован не только металл или электролит, т. е. проводник первого или второго рода, но также и полупроводник, а в качестве диэлектрика может служить запирающий слой на границе $p-n$ -перехода в полупроводнике, разделяющий области с электронной и дырочной проводимостями.

Название «конденсатор» было введено в конце XVIII века, когда существовало представление об «электрических жидкостях» и конденсатор рассматривался как прибор для сгущения, конденсирования этих жидкостей. Сейчас это устарелое название сохраняется еще на всех языках, кроме английского, где вместо старого термина «condenser» уже широко применяется термин «capacitor» (буквально: «емкостник»).

Обычным обозначением конденсаторов в электрических схемах является знак, показанный на рис. 1, а. В станкостроении, в электрических схемах управления движением станков или других автоматизированных устройств таким знаком изображают контакты; в связи с этим для обозначения конденсатора в подобных схемах применяют знак, показанный на рис. 1, б. В полярных электролитических конденсаторах (глава XIII) одна обкладка (анод) для нормальной работы конденсатора должна иметь полярность «плюс», а вторая (катод) — полярность «минус»; для таких конденсаторов применяется обозначение по рис. 1, в. Для неполярных электролитических конденсаторов, у которых катод заменен вторым анодом, применяется знак, показанный на рис. 1, г. Для проходных конденсаторов (глава III, § 16). у которых одна из обкладок включается в

разрыв линии, несущей значительный ток, применяется знак по рис. 1, *д*.

Все эти обозначения относятся к конденсаторам постоянной емкости, в конструкции которых не предусмотрена возможность управления емкостью. Для конденсатора переменной емкости, конструкция которого позволяет плавно изменять его емкость, применяется знак, показанный на рис. 1, *е*. Для блока конден-

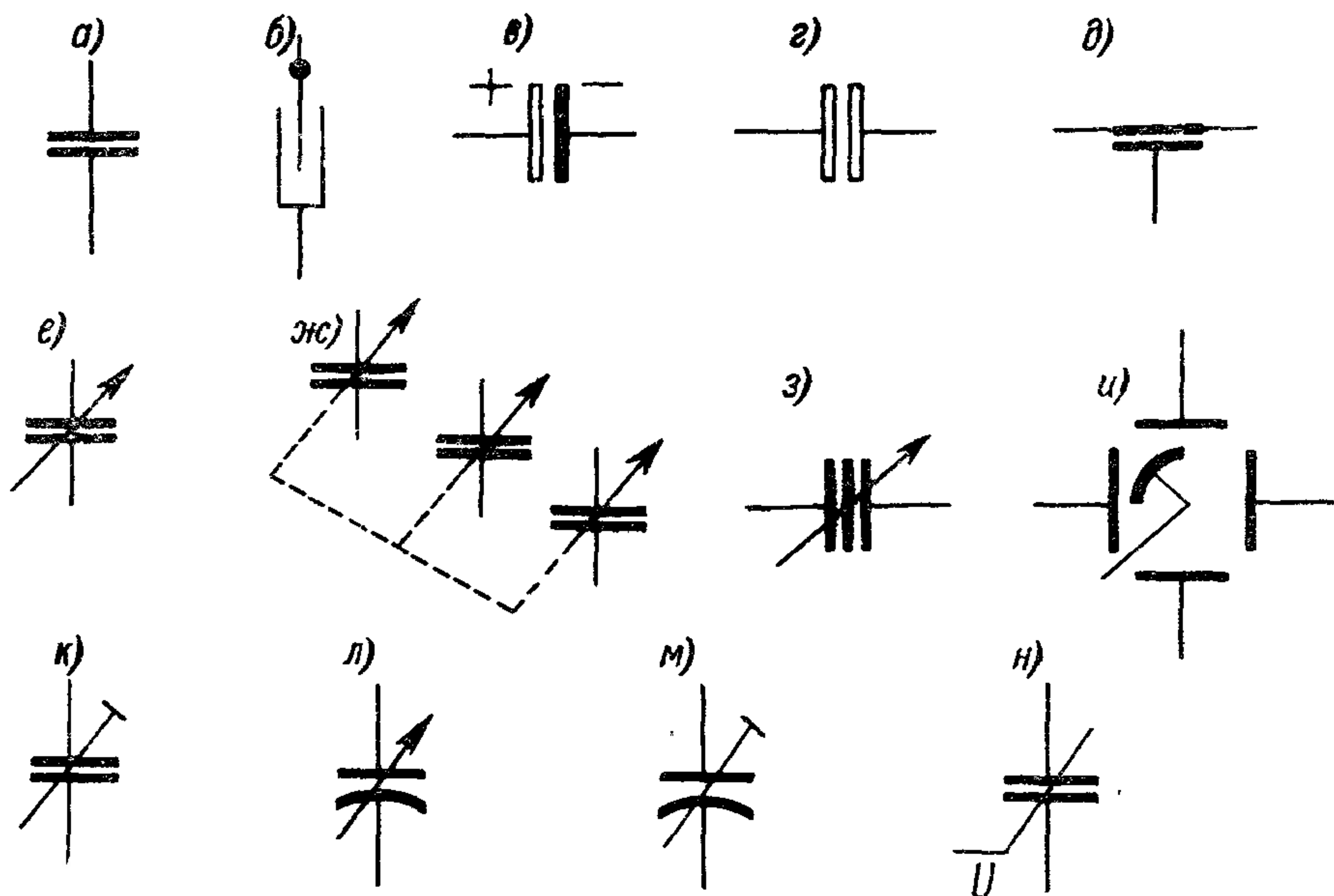


Рис. 1. Условные обозначения конденсаторов в электрических схемах: *а* — конденсатор постоянной емкости; *б* — то же в тех случаях, когда обозначение *а* использовано для указания контактов; *в* — полярный электрический конденсатор; *г* — неполярный электролитический конденсатор; *д* — проходной конденсатор; *е* — переменный конденсатор; *ж* — блок переменных конденсаторов; *з* — дифференциальный конденсатор; *и* — фазовращательный конденсатор; *к* — подстроечный конденсатор; *л* и *м* — то же, что *е* и *к*, но с выделением подвижной части; *н* — конденсатор с емкостью, зависящей от напряжения.

саторов переменной емкости, т. е. для группы таких конденсаторов, связанных общей системой управления, применяется знак рис. 1, *ж*. Для специальных типов конденсаторов переменной емкости: дифференциального и фазовращательного (глава XIV) применяются, соответственно, знаки по рис. 1, *з* и *и*. Для подстроечных (полупеременных) конденсаторов, емкость которых изменяется только в процессе настройки аппаратуры, после чего подвижная часть конденсатора закрепляется в выбранном положении, и далее конденсатор уже работает как конденсатор постоянной емкости, применяется знак, показанный на рис. 1, *к*.

Если в обозначении конденсатора переменной емкости или подстроечного необходимо особо выделить подвижную часть, то

она изображается в виде закругленной линии, как показано на рис. 1, и и м. В последние годы, наряду с обычными конденсаторами переменной емкости, в которых управление осуществляется механическим путем, появились конденсаторы нового типа: вариконды и варикапы, у которых емкость зависит от напряжения, что позволяет осуществить электрическое управление емкостью (гл. XV). Для таких конденсаторов предложено обозначение, показанное на рис. 1, н. Показанные выше знаки предусмотрены в ГОСТ 7624—62.

§ 2. Краткие сведения об истории конденсаторов

Первые сведения о конденсаторах относятся к середине XVIII века. Эти конденсаторы представляли собой стеклянные сосуды, наполненные водой, служившей первой обкладкой и присоединяемой к электростатическому генератору. Второй обкладкой служила ладонь экспериментатора, прикладываемая ко дну стеклянного сосуда. Применение конденсатора позволяло резко усилить эффект от разряда маломощного электростатического генератора, являвшегося в то время единственным источником электроэнергии.

Приоритет в изобретении конденсатора ранее приписывали Ван Мушенброку, профессору Лейденского университета (Голландия). Отсюда появилось название «Лейденская банка» для стеклянного конденсатора. Однако, по-видимому, правильнее считать изобретателем конденсатора Эвальда Георга фон Клейста, прелата собора в г. Камине (Германия). Дата изобретения конденсатора: 11 октября 1745 г.

Первые сведения о появлении конденсаторов в России относятся к 1752 г. Стеклянные банки, наполненные дробью и обклеенные снаружи металлической фольгой, применялись М. В. Ломоносовым и Г. Рихтером при исследовании атмосферного электричества. Эти банки изготовил механик Академии наук Иван Соколов. В этот же период времени первое физическое объяснение действия конденсатора, близкое к современным представлениям, дал профессор физики Санкт-Петербургской Академии наук Ульрих Теодор Эпинус. Им же был изготовлен первый воздушный конденсатор плоского типа для доказательства того, что конденсатор может быть получен не только с применением стекла, но и других диэлектриков («электрических тел», по терминологии того времени), что ранее оспаривалось.

Интересно отметить, что электрический конденсатор относится к числу изобретений, появившихся много ранее того времени, когда создались условия для их широкого внедрения в технику. В течение первых ста лет с момента его изобретения конденсатор употреблялся или в виде научной игрушки или как вспомогательный прибор для физических исследований в лабораториях. Начало технического применения конденсаторов

относится к середине XIX века. В 1856 г. был выдан английский патент Исхаму Баггсу на использование разряда стеклянных конденсаторов для зажигания газовых ламп, а также для целей телеграфирования, что можно считать первым применением конденсаторов в технике связи. В 1877 г. П. Н. Яблочкову был выдан французский патент на «систему распределения и усиления атмосферным электричеством токов, получаемых от одного источника света с целью одновременного питания нескольких светильников». Эту дату можно считать началом применения конденсаторов в силовой электротехнике. Наряду со стеклянными конденсаторами в патенте Яблочкова предусматривалась возможность использования конденсаторов с диэлектриком из парафинированной бумаги. Бумажные пропитанные конденсаторы до сих пор остаются основным типом силовых конденсаторов.

Первые шаги в области технического применения конденсаторов вызвали интерес к изучению их свойств. Среди ученых, уделивших внимание этому вопросу, следует отметить прежде всего Майкла Фарадея, который впервые ввел понятие о диэлектрической проницаемости диэлектрика конденсатора (назвав ее «удельной индуктивной емкостью»). Заслуги Фарадея отмечены тем, что по его фамилии названа единица емкости. Первая работа на русском языке по изучению потерь в стеклянных конденсаторах была опубликована И. И. Боргманом в 1886 г.

До конца XIX века техническое использование конденсаторов имело ограниченный характер. Необходимость их широкого промышленного производства возникла только после изобретения радио в 1895 г. А. С. Поповым. В связи с быстрым развитием производства радиостанций, прежде всего для военно-морских флотов, уже в первые годы XX века за рубежом возникает ряд фирм, специализирующихся на изготовлении конденсаторов.

В этот же период времени появляется слюдяной конденсатор, быстро завоевывающий широкое применение в радиотехнике. Создаются также переменные воздушные конденсаторы и первые образцы электролитических алюминиевых конденсаторов жидкостного типа. На основе производственной базы по изготовлению радиоконденсаторов за рубежом начинается выпуск бумажных силовых конденсаторов. Производят такие конденсаторы также некоторые трансформаторостроительные фирмы, что накладывает свой отпечаток на конструкцию выпускаемых ими типов силовых конденсаторов большой реактивной мощности, приобретающих внешнее сходство с силовыми трансформаторами.

Царская Россия заказывала радиоаппаратуру зарубежным фирмам, а потому в этот период в нашей стране не было условий для развития конденсаторостроения. Известно, однако, что в 1911 г. небольшое производство конденсаторов (стеклянных, воздушных и бумажных, пропитанных бакелитом или шеллаком) возникло при Радиопедо морского ведомства, где группа русских

инженеров-энтузиастов работала над созданием отечественных образцов радиостанций.

Масштабы этого производства были столь невелики, что начальным периодом создания отечественного конденсаторостроения можно считать лишь 20-е годы этого столетия, когда уже после Октябрьской революции появились подсобные конденсаторные цехи на заводах, выпускающих аппаратуру проводной связи и радиоаппаратуру.

Этот период развития советского конденсаторостроения (примерно 1920—1930 гг.) характеризуется полукустарным производством конденсаторов из импортного сырья, с использованием примитивного оборудования, под руководством мастеров-практиков. Выпускаются бумажные и слюдяные конденсаторы, скопированные с заграничных образцов и часто носившие название своих прототипов (конденсаторы типа «Дюбилъе», «Треву» и т. д.).

К началу первой пятилетки (1928 г.) складывается убеждение, что вопросам качества конденсаторов и расширения их производства необходимо уделять больше внимания, так как в противном случае будет тормозиться развитие всей советской техники связи. Созревает также необходимость решения вопроса о постановке отечественного производства силовых конденсаторов, так как возрастающую потребность в этих конденсаторах приходится удовлетворять за счет импорта.

В связи с этим советское конденсаторостроение вступает во второй этап своего развития (примерно 1931—1941 гг.). Начало этого этапа характеризуется укреплением руководства конденсаторными цехами путем замены практиков инженерами-электриками и развитием научно-исследовательской базы по изучению свойств конденсаторов и технологии их изготовления как в заводских лабораториях, так и в Центральной радиолaborатории (ЦРЛ), организованной в начале первой пятилетки. За несколько лет производится замена импортных материалов — отечественными, что создает сырьевую базу для дальнейшего расширения конденсаторного производства; разрабатываются и осваиваются в производстве новые, улучшенные конструкции бумажных и слюдяных конденсаторов телефонного типа и радиотипа; ставится производство сухих электролитических конденсаторов, разрабатываются первые образцы керамических конденсаторов; разрабатываются силовые бумажномасляные конденсаторы и ставится их производство сначала в Опытных мастерских Киевского политехнического института, а затем на Московском трансформаторном заводе; разрабатываются первые образцы импульсных конденсаторов высокого напряжения.

В конце рассматриваемого периода в СССР выпускаются все основные типы конденсаторов, необходимые для народного хозяйства; качество их достаточно высоко, но масштабы производства, ограниченные рамками вспомогательных цехов, оказываются однако недостаточными в сравнении с быстрым развитием

советской электротехники и радиотехники, и конденсатор продолжает оставаться дефицитным изделием.

Возникает задача создания специализированного массового конденсаторного производства на специально построенных для этого заводах. Однако решение этой задачи задерживается в связи с началом Великой Отечественной войны.

В период войны конденсаторные цехи перебазировались в восточные районы страны, где быстро организуется производство конденсаторов для нужд оборонной аппаратуры связи. Проводится большая работа по подбору заменителей для материалов, ставших дефицитными в условиях военного времени, и по использованию в конденсаторном производстве местного сырья восточных районов. В то же время разрабатывается ряд новых типов конденсаторов и ставится их производство; в частности, керамические конденсаторы, выпуск которых до войны носил опытный характер, превращаются в продукцию массового изготовления. Создаются новые типы высокочастотных конденсаторов — серные и газонаполненные — и модернизируется конструкция слюдяных контурных конденсаторов. В конце военного времени строятся два первых специализированных завода по выпуску радиоконденсаторов и силовых конденсаторов.

По окончании войны продолжается строительство новых конденсаторных заводов в ряде городов СССР и осваивается выпуск технологического и контрольно-измерительного оборудования для оснащения конденсаторного производства. Для обеспечения этого производства инженерными кадрами организуется специализация по конденсаторостроению при кафедре электроизоляции и кабельной техники Ленинградского политехнического института, а затем и Всесоюзного заочного энергетического института. Проводится большая работа по повышению качества и стандартизации основных материалов для конденсаторостроения и осваивается массовый выпуск стандартизованных типов бумажных слюдяных, керамических и электролитических конденсаторов, как в уплотненном, так и в герметизированном исполнении. Разрабатываются и осваиваются в производстве металлобумажные, вакуумные, стеклоэмалевые и пленочные конденсаторы. Новейшими типами конденсаторов, разработанными в последнее время, являются: оксидно-полупроводниковые электролитические, лакопленочные, керамические монолитные, полупроводниковые переменной емкости и др.

§ 3. Современное состояние конденсаторостроения

В настоящее время развитие новых областей техники ставит перед советским конденсаторостроением задачи разработки и освоения новых типов конденсаторов; эти задачи успешно разрешаются.

К областям техники, требующим создания новых типов конденсаторов, относятся: производство счетно-решающих устройств,

строительство сверхскоростных самолетов, ракетная техника, космическая техника, применение атомной энергии для мирных целей, лазерная техника, магнитноимпульсная обработка металлов, сверхглубокое бурение и т. д.

Новые области техники предъявляют повышенные требования к качеству и надежности конденсаторов. Для выполнения этих требований необходимо резкое улучшение технологической дисциплины и повышение культуры производства. Надо создавать на предприятиях «гигиенические цехи», в которых приняты специальные меры для обеспыливания помещений и поддержания в них заданных условий температуры и влажности воздуха. Особое значение приобретает также тщательный контроль качества материалов, используемых в конденсаторном производстве.

Одновременно с этим расширение производства широкодиапазонных приемников и телевизоров, а также бытовой электроаппаратуры и устройств люминесцентного освещения, предусмотряемое планами развития народного хозяйства СССР и программой КНСС, требует быстрого расширения выпуска стандартизованных типов конденсаторов. Эта задача решается не только строительством новых конденсаторных заводов, но и максимальной автоматизацией и механизацией производства на уже существующих заводах. На ряде заводов уже работают не только многочисленные полуавтоматы и автоматы для выполнения отдельных технологических или контрольно-измерительных операций, но и отдельные автоматические линии, выполняющие целый комплекс таких операций. Развитие этой работы должно привести к появлению цехов-автоматов по производству особо массовых типов радиоконденсаторов.

Резкий рост производства электроэнергии в нашей стране и постройка линий электропередач большого протяжения требуют дальнейшего расширения производства силовых конденсаторов для улучшения коэффициента мощности и для продольной емкостной компенсации линий электропередач. Специальные типы конденсаторов требуются в связи с применением постоянного тока для дальних передач электроэнергии. Задачи увеличения выпуска силовых конденсаторов решаются как расширением производства на уже существующих заводах, так и строительством новых.

В настоящее время производство конденсаторов ведется во всех индустриальных странах мира, как в странах капитализма, так и в странах народной демократии. Ведущее положение в капиталистическом мире по масштабам конденсаторостроения занимают сейчас США и Япония, с которыми СССР успешно соревнуется.

Масштабы мирового конденсаторостроения характеризуются в настоящее время годовым выпуском конденсаторов для электронной техники, исчисляющимся несколькими миллиардами штук; в ряде стран ежедневный выпуск превышает 1—2 миллиона штук. Суммарная реактивная мощность выпускаемых в мире силовых конденсаторов достигает 15—20 миллионов квар в год.

§ 4. Основные области применения конденсаторов

В современной технике конденсаторы находят себе исключительно широкое и разностороннее применение, прежде всего в области электроники. Здесь можно отметить их применение для следующих основных целей:

1. В радиотехнической и телевизионной аппаратуре — для создания колебательных контуров, их настройки, блокировки, разделения цепей с различной частотой, в фильтрах выпрямителей и т. д.

2. В радиолокационной технике — для получения импульсов большой мощности, формирования импульсов и т. д.

3. В телефонии и телеграфии — для разделения цепей постоянного и переменного токов, разделения токов различной частоты, искрогашения в контактах, симметрирования кабельных линий и т. д.

4. В автоматике и телемеханике — для создания датчиков на емкостном принципе, разделения цепей постоянного и пульсирующего токов, искрогашения в контактах, в схемах тиратронных генераторов импульсов и т. д.

5. В технике счетно-решающих устройств — в специальных запоминающих устройствах и т. д.

6. В электроизмерительной технике — для создания образцов емкости, получения переменной емкости (магазины емкости и лабораторные переменные конденсаторы), создания измерительных приборов на емкостном принципе и т. д.

7. В лазерной технике — для получения мощных импульсов.

В современной электроэнергетике конденсатор находит себе также весьма разнообразное и ответственное применение:

для улучшения коэффициента мощности промышленных установок (косинусные или шунтовые конденсаторы);

для продольной емкостной компенсации дальних линий передач и для регулирования напряжения в распределительных сетях (серийные конденсаторы);

для емкостного отбора энергии от линий передач высокого напряжения и для подключения к линиям передачи специальной аппаратуры связи и защитной аппаратуры (конденсаторы связи);

для защиты от перенапряжений;

для применения в схемах генераторов импульсов напряжения (ГИН) и генераторов мощных импульсов тока (ГИТ), используемых при испытаниях электротехнической аппаратуры;

для электрической сварки разрядом;

для пуска конденсаторных электродвигателей (пусковые конденсаторы) и для создания нужного сдвига фаз в дополнительной обмотке этих двигателей;

в устройствах освещения люминесцентными лампами;

для подавления радиопомех, создаваемых электрическими машинами и подвижным составом электрифицированного транспорта.

Кроме электроники и электроэнергетики, конденсаторы применяют и в других, неэлектротехнических областях техники и промышленности для следующих основных целей:

1. В металлопромышленности — в высокочастотных установках для плавки и термической обработки металлов, в электроэрозионных (электроискровых) установках, для магнитоимпульсной обработки металлов и т. д.

2. В добывающей промышленности (угольной, металлорудной и т. п.) — в рудничном транспорте на конденсаторных электровозах нормальной и повышенной частоты (бесконтактных), в электровзрывных устройствах, в устройствах с использованием электрогидравлического эффекта и т. д.

3. В автотракторной технике — в схемах зажигания для искрогашения в контактах и для подавления радиопомех.

4. В медицинской технике — в рентгеновской аппаратуре, в устройствах электротерапии и т. д.

5. В технике использования атомной энергии для мирных целей — для изготовления дозиметров, для кратковременного получения больших токов и т. д.

6. В фотографической технике — для аэрофотосъемки, получения вспышки света при обычном фотографировании и т. д.

Разнообразие областей применения обуславливает исключительно большое разнообразие типов конденсаторов, используемых современной техникой. Поэтому наряду с миниатюрными конденсаторами, имеющими вес менее грамма и размеры порядка нескольких миллиметров, можно встретить конденсаторы с весом несколько тонн и по высоте превышающие человеческий рост. Емкость современных конденсаторов может составлять от долей пикофарады до нескольких десятков и даже сотен тысяч микрофарад в единице, а номинальное рабочее напряжение может лежать в пределах от нескольких вольт до нескольких сотен киловольт.

§ 5. Классификация конденсаторов

Электрические свойства, конструкция и область применения всякого конденсатора в максимальной степени определяются диэлектриком, разделяющим его обкладки. Поэтому конденсаторы правильнее всего классифицировать по роду диэлектрика. В соответствии с этим можно привести следующую схему классификации:

1. Конденсаторы постоянной емкости.

1. Конденсаторы с газообразным диэлектриком: воздушные, газонаполненные и вакуумные.

2. Конденсаторы с жидким диэлектриком.

3. Конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком: стеклянные (стеклоэмалевые, стеклокерамические, стеклопленочные), слюдяные, керамические (низкочастотные и высокочастотные), тонкослойные из неорганических пленок.

4. Конденсаторы с твердым органическим диэлектриком:

бумажные, металлобумажные, пленочные (из неполярных пленок и из полярных пленок), комбинированные — бумажнопленочные, тонкослойные из органических синтетических пленок (тонкопленочные).

5. Электролитические (оксидные) конденсаторы: алюминиевые, танталовые, ниобиевые, титановые. Эти конденсаторы можно также различать по типу конструкции на жидкостные, сухие, твердые (оксидно-полупроводниковые) и оксидно-металлические.

II. Конденсаторы переменной емкости

А. С механическим управлением величиной емкости

1. С газообразным диэлектриком: воздушные, газонаполненные, вакуумные.

2. С жидким диэлектриком.

3. С твердым диэлектриком: керамические, стеклянные, пластмассовые.

Б. С электрическим управлением величиной емкости

1. Сегнетокерамические (вариконды):

2. Полупроводниковые (варикапы).

При заданном типе диэлектрика конденсаторы можно классифицировать дополнительно по тому режиму работы, для которого предназначается данный конденсатор. При этом различают следующие основные режимы работы: 1) при постоянном или выпрямленном напряжении; 2) при переменном напряжении технической частоты, 50 *гц*; 3) при звуковых частотах, 100—10 000 *гц*; 4) при радиочастотах, 0,1—100 *Мгц*; 5) при импульсных режимах (при единичных импульсах или при повторяющихся импульсах постоянной или переменной полярности).

В каждом из этих случаев различают конденсаторы низкого и высокого напряжения (низковольтные и высоковольтные). Обычно под термином «низкое» напряжение, применительно к рабочему напряжению конденсаторов, понимают напряжение порядка нескольких сотен вольт и ниже (для электролитических конденсаторов — порядка нескольких десятков вольт и ниже). При переменном напряжении различают конденсаторы большой и малой мощности, обычно понимая под термином «большая мощность» значение реактивной мощности порядка нескольких киловольтампер и выше.

У конденсаторов, предназначенных для использования в электронной технике, в маркировке обычно указывается номинальное рабочее напряжение постоянного тока. Стандартные значения этого напряжения от 1,5 *в* до 100 *кв* оговорены в ГОСТ 9665—61. Для силовых конденсаторов обычно указывается действующее значение рабочего напряжения при частоте 50 *гц*.

В ряде случаев конденсаторы различают также по их применению, присваивая им дополнительное наименование, указывающее на основной характер использования конденсатора: контурный, фильтровой, анодноразделительный, импульсный, косинусный, пусковой, защитный и т. д.

Часть первая

ОБЩИЕ СВОЙСТВА И ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

Глава I

ЕМКОСТЬ

§ 6. Основные формулы

Основное свойство конденсатора — его е м к о с т ь, т. е. способность накапливать на обкладках электрический заряд, характеризуется отношением заряда Q к величине напряжения U , приложенного к обкладкам:

$$C = \frac{Q}{U}. \quad (1)$$

Выражая Q в кулонах и U в вольтах, получаем C в ф а р а д а х (ϕ). Фарада слишком крупная единица емкости, а потому обычно пользуются меньшей единицей — м и к р о ф а р а д о й (мкф): $1 \text{ мкф} = 1 \cdot 10^{-6} \phi$, или еще меньшей единицей — п и к о ф а р а д о й (пф), иначе называемой микромикрофарадой (мкмкф): $1 \text{ пф} = 1 \text{ мкмкф} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ мкф} = 1 \cdot 10^{-12} \phi$.

Иногда применяется также промежуточная единица емкости, называемая н а н о ф а р а д о й (нф): $1 \text{ нф} = 1000 \text{ пф} = 0,001 \text{ мкф} = 1 \cdot 10^{-9} \phi$.

Ранее часто пользовались также абсолютной электростатической единицей емкости — сантиметром (см). Емкостью в 1 см обладает уединенный проводящий шар, имеющий радиус, равный 1 см . Эта единица емкости близка по величине к пикофараде: $1 \text{ см} = 1,11 \text{ пф}$; $1 \text{ пф} = 0,9 \text{ см}$; $1 \text{ см} = 1,11 \cdot 10^{-6} \text{ мкф}$; $1 \text{ мкф} = 9 \cdot 10^5 \text{ см}$. Радиус земного шара равен 6378,5 км; следовательно, его емкость равна $637,85 \cdot 10^6 \text{ см}$, или около 708 мкф .

Емкость каждого конденсатора зависит от его геометрических размеров (от площади обкладок и расстояния между ними) и от рода диэлектрика, разделяющего обкладки (от величины диэлектрической проницаемости).

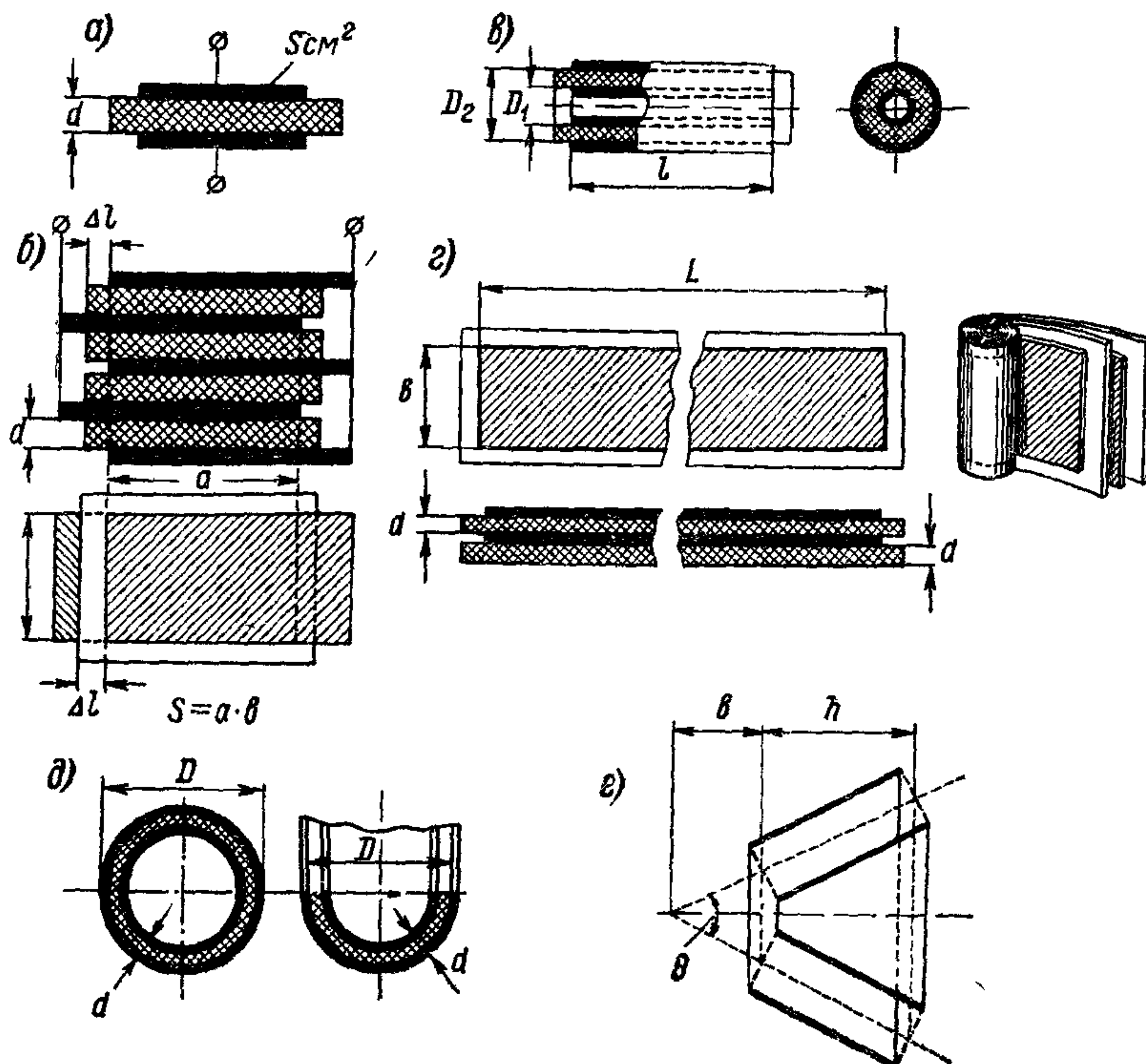


Рис. 2. Основные типы конденсаторов: а — плоский с двумя обкладками; б — плоский многопластинчатый; в — цилиндрический, г — спиральный намотанный конденсатор; д — шаровой конденсатор; е — конический конденсатор.

В простейшем случае (плоский конденсатор с двумя обкладками, рис. 2, а) емкость конденсатора выражается формулой

$$C = 0,0884 \frac{\varepsilon S}{d}, \quad (2)$$

где C — емкость в пф , ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, S — площадь обкладки в см^2 , d — толщина диэлектрика (расстояние между обкладками) в см .

Для плоского многопластинчатого конденсатора, собранного из N обкладок, соединенных через одну параллельно (рис. 2, б), емкость вычисляется по формуле

$$C = 0,0884 \frac{\varepsilon S (N - 1)}{d}. \quad (3)$$

Наряду с плоскими конденсаторами иногда применяют также цилиндрический, представляющий собой два коаксиальных проводящих цилиндра, разделенных диэлектриком (рис. 2, в). Емкость такого конденсатора равна:

$$C = 0,241 \frac{\varepsilon l}{\lg_{10} \frac{D_2}{D_1}}, \quad (4)$$

где l — длина цилиндров (длина обкладок) в см, D_2 — внешний диаметр внутреннего цилиндра (внутренней обкладки) в см, D_1 — внутренний диаметр внешнего цилиндра (внешней обкладки) в см.

Некоторые типы конденсаторов изготавливаются намоткой (на специальных станках) из диэлектрика, имеющего ленточную форму, и представляют собой спиральные конденсаторы (рис. 2, г). Емкость спирального конденсатора равна удвоенному значению емкости такого же конденсатора, но развернутого в плоскую длинную ленту:

$$C = 0,1768 \frac{\varepsilon b L}{d}, \quad (5)$$

где b — ширина обкладок в см, L — длина обкладок в см, d — толщина диэлектрика между обкладками в см.

При подсчетах по формулам (2) — (5) значение емкости получается в пикофарадах. Если подставить в формулу (5) значения b в сантиметрах, L — в метрах и d — в микронах (мкм), то значение емкости получится в микрофарадах.

При намотке спиральных конденсаторов важно знать зависимость числа витков W от емкости наматываемого конденсатора. Эта зависимость выражается формулами (6) и (7).

При намотке на цилиндрическую оправку диаметром D_0 (в см)

$$W = \frac{2,5 \cdot 10^3 (D - D_0)}{d + d_0}, \quad (6)$$

где D — наружный диаметр конденсатора, намотанного на оправку:

$$D = \sqrt{D_0^2 + kC} \quad \text{и} \quad k = \frac{0,144 (d + d_0) d}{\varepsilon b}$$

Здесь C — в мкф, D , D_0 и b — в см, а d и d_0 — в мкм. При намотке на тонкую плоскую оправку шириной B (в см)

$$W = \sqrt{k_1 C + k_2^2} - k_2, \quad (7)$$

где

$$k_1 = \frac{7,05 \cdot 10^5 d}{\varepsilon b (d + d_0)} \quad \text{и} \quad k_2 = \frac{1,25 \cdot 10^3 B}{d + d_0}.$$

В этих формулах использованы следующие обозначения: ε — диэлектрическая проницаемость, b — ширина обкладки в см,

d — толщина диэлектрика между обкладками в *мм*, d_0 — толщина обкладки в *мм*, C — емкость конденсатора в *мкф*.

Иногда при намотке спиральных конденсаторов исходят не из числа витков, а из длины или площади обкладки. В этом случае площадь обкладки, выраженная в *см²*, определяется по формуле

$$S = bL = k_n C d, \quad (8)$$

где L — длина обкладки в *см*, b — ширина обкладки в *см*, C — емкость в *мкф*, d — толщина диэлектрика в *мм*. Значение коэффициента намотки k_n равно:

$$k_n = \frac{567}{\varepsilon} = \frac{S}{C d} \text{ [см}^2\text{/мкф} \cdot \text{мм]}. \quad (9)$$

Если выражать L в *м*, а b в *мм* и d в *мм*, то значение коэффициента намотки окажется равным:

$$k_n = \frac{56,7}{\varepsilon} \text{ [м} \cdot \text{мм/мкф} \cdot \text{мм]}.$$

Для намотанного конденсатора величина эффективной диэлектрической проницаемости ε зависит от числа слоев диэлектрика между обкладками и от степени сжатия конденсаторных секций при их прессовке (или от напряжения при намотке для непрессованных цилиндрических секций), т. е. от числа и величины небольших зазоров между лентами диэлектрика и обкладками. Величину этих зазоров трудно рассчитать, а потому на практике значение k_n обычно не вычисляют по величине ε , а определяют опытным путем, разматывая пробные секции после измерения их емкости и определяя соответствующее значение площади обкладок в этих секциях. При этом для нахождения k_n по правой части формулы (9) используют номинальное значение толщины лент диэлектрика.

В американской литературе принято выражать S в квадратных дюймах, а толщину диэлектрика d в миллах (тысячных долях дюйма). В этом случае имеем:

$$k_n = \frac{2200}{\varepsilon} \text{ [дюйм}^2\text{/мкф} \cdot \text{мил]}.$$

Используя это выражение, можно найти значение эффективной диэлектрической проницаемости диэлектрика конденсатора, если известно значение k_n , приводимое американским автором.

Кроме плоской, цилиндрической и спиральной конструкций конденсаторов в отдельных случаях могут встретиться и иные их формы.

Емкость шарового (сферического) конденсатора выражается формулой:

$$C = \frac{\varepsilon}{3,6} \cdot \frac{D(D+d)}{d} \text{ [нф]}, \quad (10)$$

где D — наружный диаметр шара, а d — толщина стенки (*см*).

Практически, при расчете керамических конденсаторов горшкового типа (гл. XI) для вычисления емкости дна конденсатора (полусферы) можно использовать формулу (10), взяв численный коэффициент равным 7,2 вместо 3,6 (рис. 9, б).

Емкость конического конденсатора при величине угла θ в пределах от 20° до 45° можно вычислить по формуле

$$C = 55,6h \frac{\varepsilon}{\ln \left[1 + 2 \left(\frac{b}{h} \right) \cos^2 \theta \right]} [n\phi]. \quad (11)$$

Размеры b и h (по рис. 2, е) надо подставить в см.

Приведенные выше формулы для вычисления емкости получены для случая однородного электрического поля и не учитывают его искажения у края обкладок. При малых значениях d и больших значениях S этим искажением можно пренебречь, но для конденсаторов малой емкости высокого напряжения с относительно большой толщиной диэлектрика необходимо вносить поправку.

Для плоского дискового конденсатора (рис. 3, а) при диаметре обкладки, равной диаметру диска, к величине емкости, вычисленной по формуле (2), надо прибавить поправку, вычисляемую по формуле

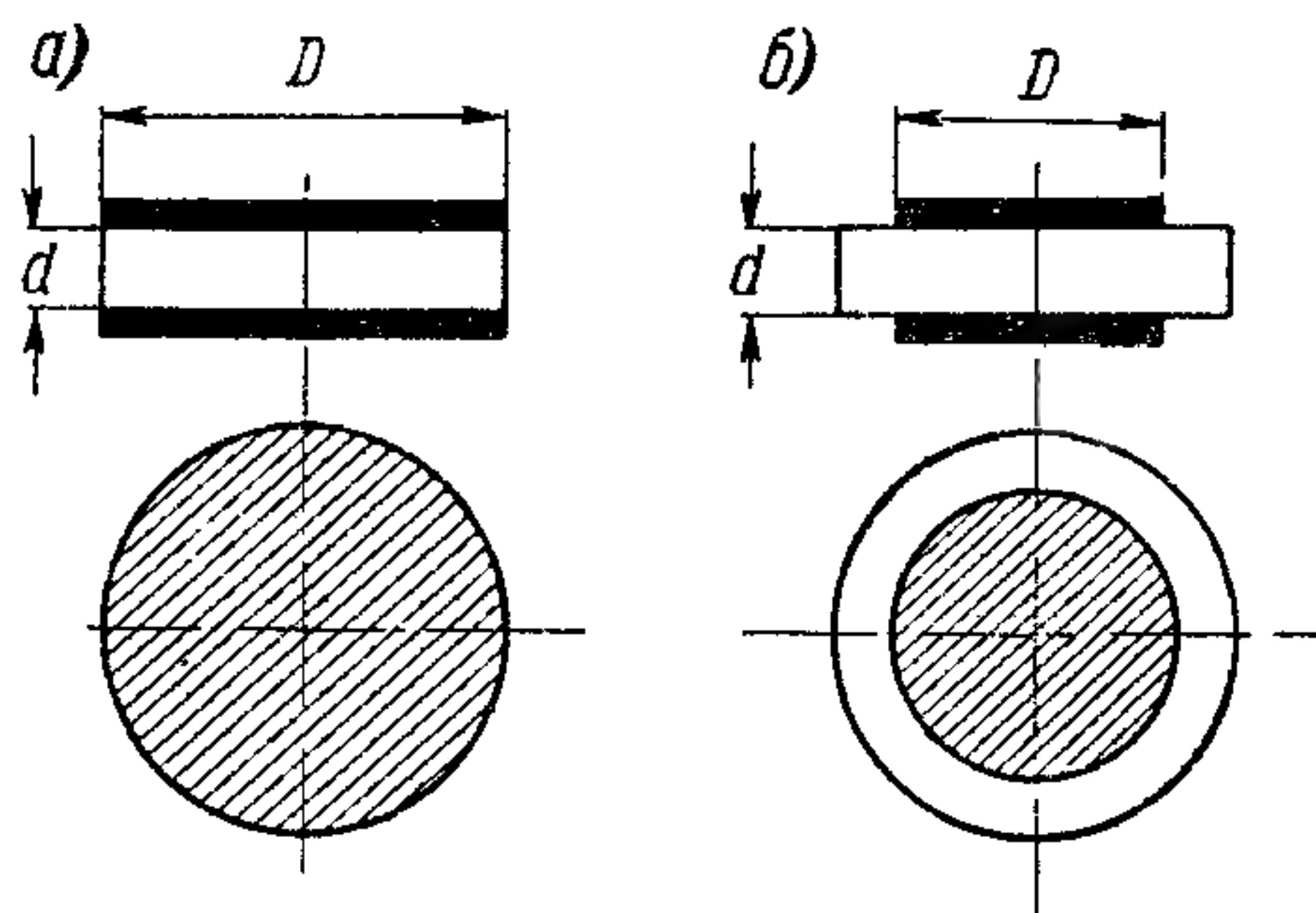


Рис. 3. Плоский дисковый конденсатор: а — край обкладки совпадает с краем диэлектрика; б — край обкладки не доходит до края диэлектрика.

$$\Delta C_k = 1,5 \frac{d}{D} \left[\ln \left(25 \frac{D}{d} \right) - 1,305 \right], \quad (12)$$

где D — диаметр диска в см, d — толщина диэлектрика в см.

Значение поправки получается в пикофарадах. Если края обкладки не доходят до краев диска (как на рис. 3, б), то уточненная формула для вычисления емкости с учетом поправки на краевой эффект имеет вид

$$C = 0,0694 \frac{\varepsilon (D + \Delta D_k)^2}{d}, \quad (13)$$

где обозначения те же, что и выше, а ΔD_k — поправка на величину диаметра, учитывающая увеличение емкости. Аналогичная формула для цилиндрического конденсатора (рис. 2, в):

$$C = 0,241 \frac{\varepsilon (l + \Delta l_k)}{\lg_{10} \frac{D_2}{D_1}}, \quad (14)$$

где Δl_k — поправка на величину длины обкладки, а остальные величины те же, что и входящие в формулу (4).

Величина поправки

$$\Delta D_k = \Delta l_k = 0,5d,$$

где d — толщина диэлектрика.

В высоковольтных керамических конденсаторах выполняют краевое утолщение диэлектрика для выравнивания поля у края обкладок, причем производят проточку канавки с радиусом r («поднутрение») (рис. 78, ниже). В этом случае поправка на величину диаметра в дисковом конденсаторе (рис. 78, а) составляет:

$$\Delta D_k = 0,41(d + 2r),$$

а поправка на длину обкладки в цилиндрическом (трубчатом) конденсаторе (рис. 78, б) будет равна:

$$\Delta l_k = 0,41\left(\frac{d}{2} + r\right).$$

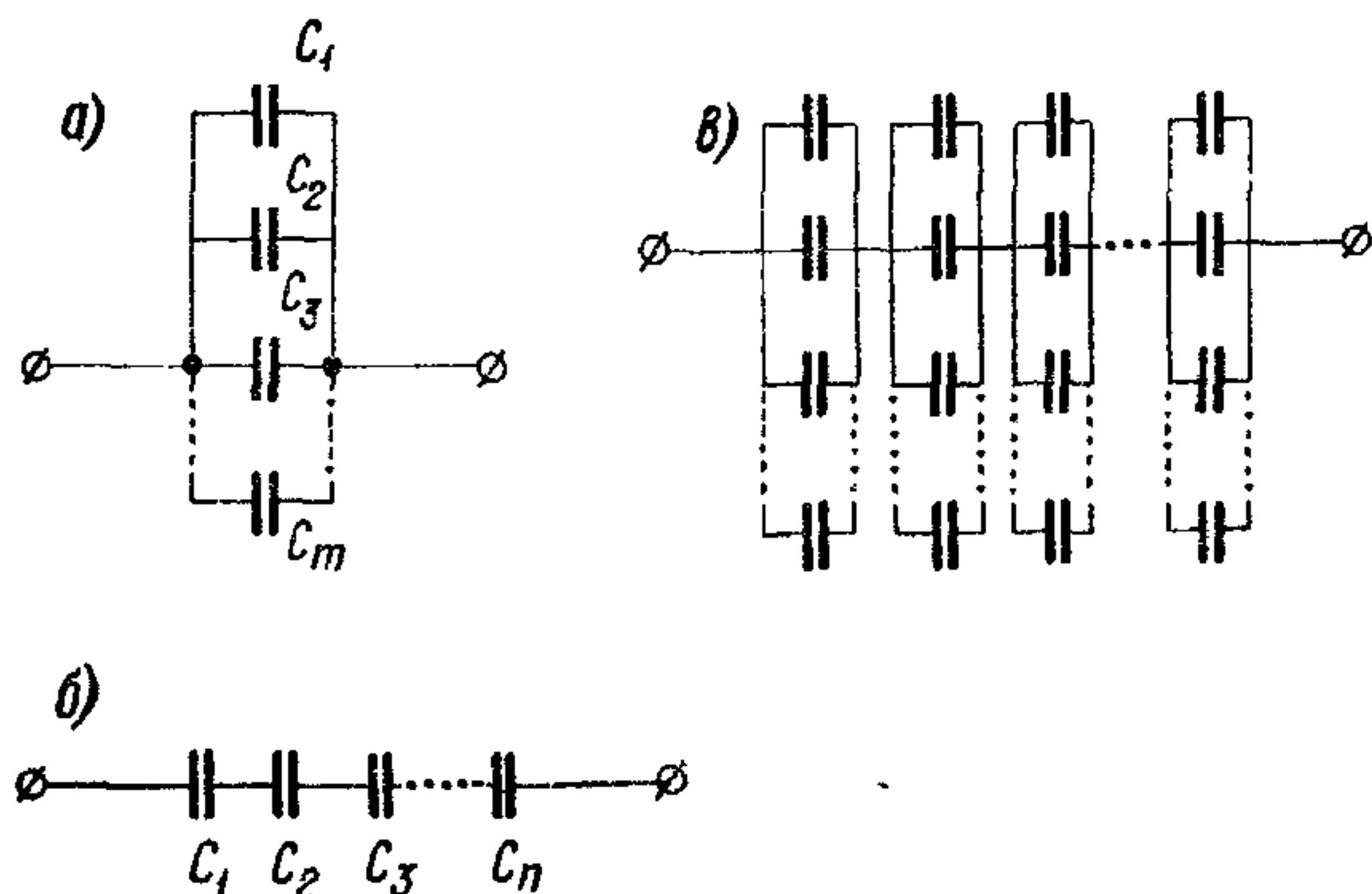


Рис. 4. Соединение конденсаторов: а — параллельное; б — последовательное; в — последовательно-параллельное (n — последовательных групп, m — параллельных ветвей).

соединенных единиц (рис. 4). При параллельном соединении общая емкость группы равна сумме емкостей отдельных единиц:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_m. \quad (15)$$

При последовательном соединении величина, обратная общей емкости группы, равна сумме обратных величин емкостей отдельных единиц:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (16)$$

При сложном последовательно-параллельном соединении конденсаторов общую ёмкость находят, применяя формулы (15) — (16) к отдельным участкам цепи и постепенно упрощая последнюю.

Конденсаторы большой емкости часто собирают из нескольких параллельно соединяемых одинаковых секций. Если число таких секций m и емкость каждой секции C_c , то емкость конденсатора будет равна:

$$C = mC_c. \quad (17)$$

Конденсаторы высокого напряжения обычно изготавливают из ряда последовательно соединяемых одинаковых секций. Если число таких секций будет n и емкость каждой секции C_c , то емкость конденсатора будет равна:

$$C = \frac{C_c}{n}. \quad (18)$$

Если конденсатор собран из n последовательно соединенных групп секций, а каждая группа составлена из m параллельно соединенных секций (рис. 4, в), то емкость такого конденсатора будет равна:

$$C = \frac{m}{n} C_c. \quad (19)$$

Такой способ соединения широко применяется в производстве мощных силовых конденсаторов высокого напряжения.

§ 7. Отклонение емкости от номинала и подгонка емкости

По точности значения емкости, т. е. по величине допускаемого отклонения емкости от ее номинального значения, указанного в маркировке (по величине допуска по емкости) конденсаторы различаются на следующие основные классы точности:

Класс	001	002	005	00	0	I	II	III	IV	V	VI
Допуск, %	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	± 1	± 2	± 5	± 10	± 20	-10 $+20$	-20 $+30$	-20 $+50$

Для образцовых конденсаторов применяется также допуск $\pm 0,25\%$, а для некоторых типов сегнетокерамических или электролитических конденсаторов: $0 \div +100\%$.

Д о п у с к п о е м к о с т и представляет собой относительную разность между измеренной емкостью $C_{изм}$ и номинальной емкостью $C_{ном}$:

$$\Delta C_n = \frac{C_{изм} - C_{ном}}{C_{ном}} \cdot 100 [\%]. \quad (20)$$

Нормы Международной Электротехнической Комиссии — МЭК (International Electrotechnical Commission — IEC) предусматривают для бумажных радиоконденсаторов следующие классы точности: $J = \pm 5\%$, $K = \pm 10\%$, $M = \pm 20\%$ и $N = \pm 30\%$.

Стандартные конденсаторы повышенных классов точности: 0 и 1 обычно просто отбираются при контроле емкости массовых партий. Если номинальные емкость и напряжение конденсаторов отличны от стандартных или если требуется отклонение емкости от номинала $\pm 1\%$ или меньше, то для обеспечения

нужной точности приходится производить подгонку емкости. Если имеется возможность собирать конденсатор из двух параллельно соединяемых секций с емкостью, примерно равной 0,5 номинального значения, то повышенную точность можно получить подбирая до сборки по две секции: с пониженной и повышенной емкостью, так чтобы сумма получилась возможно ближе к номиналу. Можно также изготовлять одну секцию с емкостью, близкой к номиналу, но заведомо меньшей его, а в качестве второй секции («довески») использовать конденсаторы малой емкости, параллельное присоединение которых повышает емкость до заданного номинального значения.

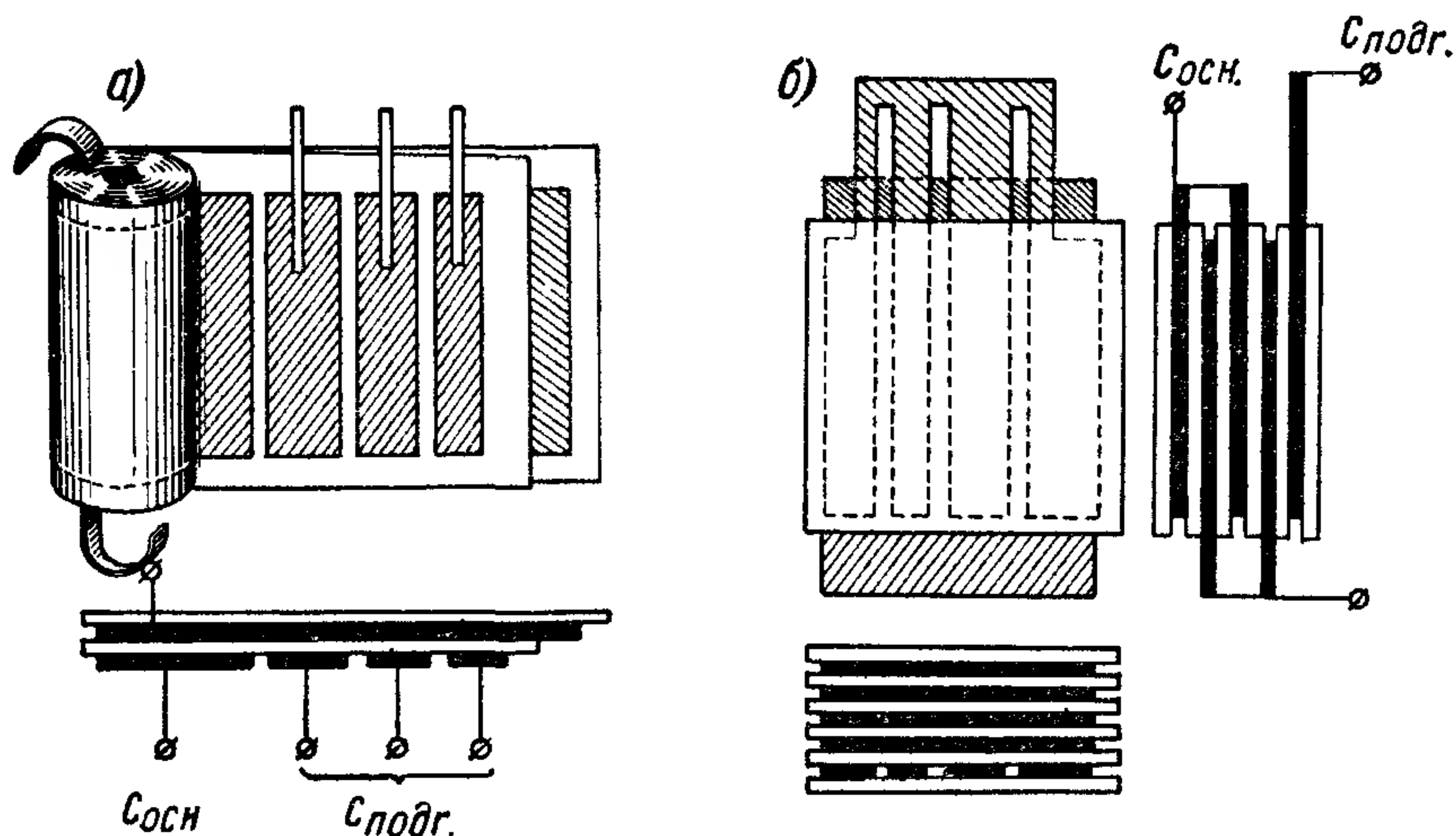


Рис. 5. Подгоночные обкладки: *a* — в намотанном конденсаторе; *б* — в многослойном конденсаторе.

Если конденсатор должен быть односекционным, то для подгонки емкости его изготовляют с несколько повышенной емкостью, а затем снижают емкость до требуемого значения путем удаления части обкладки. Кроме того, иногда применяют подгоночные обкладки (рис. 5), образующие ряд небольших емкостей. Присоединением одной или нескольких из них к основной емкости конденсаторной секции (которая в этом случае должна быть несколько меньше номинала) добиваются повышения общей емкости до требуемого значения.

Повышение точности емкости конденсатора обычно требует дополнительных затрат, а потому увеличивает его стоимость. Это надо учитывать в каждом частном случае выбора конденсаторов при установлении требований к точности их емкости. Для конденсаторов, изготовляемых по I, II и III классам точности, разработана стандартная шкала емкостей, охватывающая значения от 1 $нф$ до 2000 $мкф$ (ГОСТ 2519—67).

Для маркировки малогабаритных конденсаторов малой емкости иногда используют цветной код, различные цвета которого соответствуют следующим цифрам:

черный	0	зеленый	5
коричневый	1	синий	6
красный	2	фиолетовый	7
оранжевый	3	серый	8
желтый	4	белый	9

Цветной код для обозначения емкости наносится на корпус конденсатора в виде трех цветных кружков или точек (рис. 6). Емкость должна быть выражена в пикофарадах, с двумя значащими цифрами. Левый кружок — первая цифра, средний — вто-

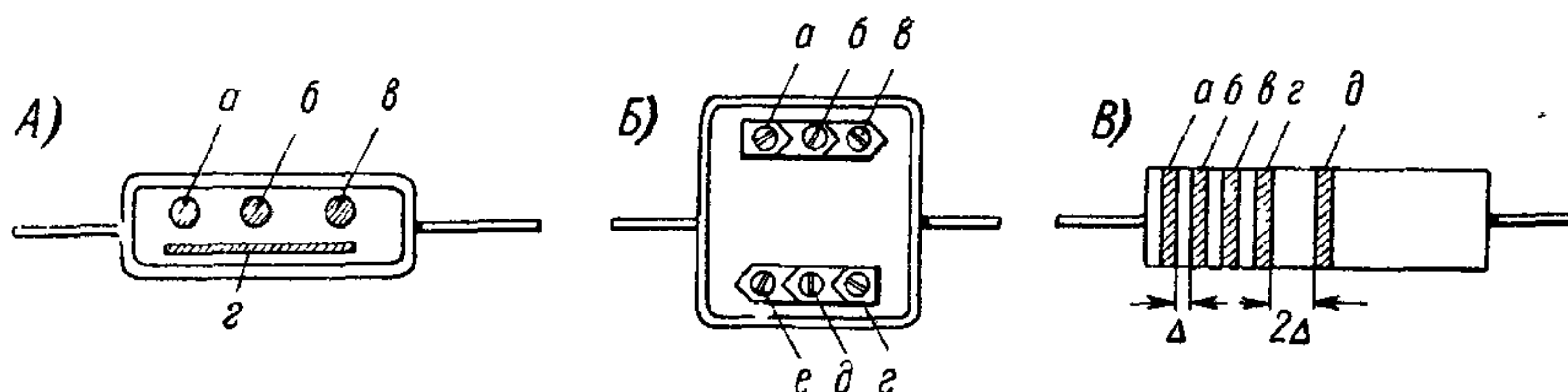


Рис. 6. Цветной код для маркировки конденсаторов: А — обозначение емкости и класса точности для опрессованного слюдяного конденсатора: *a* — первая цифра емкости, *б* — вторая цифра, *в* — число нулей, *г* — класс точности; Б — более подробное обозначение: *a*, *б*, *в* — емкость, *г* — класс точности, *д* — рабочее напряжение, *е* — группа по ТКЕ (оранжевый цвет группа А, желтый — группа Б, красный — группа В, голубой — группа Г; см. § 65); В — обозначение по нормам МЭК для бумажных трубчатых конденсаторов: *a*, *б*, *в* — емкость, *г* — допуск, *д* — рабочее напряжение.

рая цифра, правый — число нулей (ГОСТ 5042—57). Например: красный — зеленый — красный означает 2500 пф, оранжевый — синий — черный 36 пф. Дополнительный зеленый кружок (или черта) указывает, что конденсатор имеет первый класс точности (I), дополнительный белый — II класс точности, а дополнительный черный — соответствует III классу. Для обозначения класса 0 ($\pm 2\%$) применяют красный цвет. Иногда кроме дополнительного кружка для обозначения класса точности применяют также дополнительные обозначения номинального напряжения и т. д.; число цветных отметок доходит до шести (рис. 6, б). Согласно нормам МЭК для бумажных трубчатых конденсаторов цветной код составляется из пяти колец (полосок), нанесенных на корпус конденсатора ближе к одному из краев, причем расстояние от четвертого до пятого кольца должно быть в два раза больше, чем между любыми остальными (рис. 6, в). Первые три кольца обозначают емкость в пикофарадах, так же как было указано выше, четвертое кольцо обозначает допуск по емкости с таким значением цветов: синий — 5%, белый — 10%; черный —

20% и оранжевый — 30%. Пятым кольцом указывается величина номинального рабочего напряжения с таким значением цветов: черный — 100 в, коричневый — 160 в, красный — 250 в, желтый — 400 в, синий — 630 в и белый — 1 000 в (постоянный ток).

В производстве керамических конденсаторов цвет окраски корпуса часто служит для обозначения температурного коэффициента емкости конденсатора.

Все указанное здесь относится к конденсаторам, изготавливаемым заводами электронной промышленности и предназначенным для применения в электронике; силовые конденсаторы обычно имеют на щитке значение емкости, измеренное при испытании. В этом случае отличие емкости, которая указана в маркировке, от фактической емкости конденсатора будет обусловлено погрешностью прибора, с помощью которого проводилось измерение емкости, а также возможным изменением емкости за то время, которое прошло с момента испытания конденсатора на заводе-изготовителе. Номинальная мощность силовых конденсаторов указывается в ГОСТ или ТУ.

§ 8. Поляризация диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость

Влияние рода диэлектрика на величину емкости конденсатора обусловлено различной интенсивностью явления поляризации в различных диэлектриках. Поляризация диэлектрика объясняется тем, что при создании электрического поля в диэлектрике в последнем происходит смещение зарядов по направлению к металлическим обкладкам, наложенным на диэлектрик для создания поля.

В соответствии с характером поляризации различают следующие ее основные типы:

А. Д е ф о р м а ц и о н н а я п о л я р и з а ц и я, характеризующаяся упругим смещением зарядов в диэлектрике, не связанным с затратами энергии: эта поляризация может быть как электронной, так и ионной.

Б. Р е л а к с а ц и о н н а я п о л я р и з а ц и я, связанная с потерями энергии в диэлектрике и требующая известного времени для ее исчезновения после удаления поля: она может также быть электронной или ионной, а также дипольной или структурной (дипольно-радикальной). Кроме того, к релаксационным видам поляризации можно также относить м е ж д у с л о й н у ю поляризацию (миграционную) и с п о н т а н н у ю поляризацию (самопроизвольную).

Электронно-деформационная поляризация, присуща всем диэлектрикам. Другие виды поляризации могут накладываться на электронно-деформационную поляризацию в тех группах диэлектриков, которым присущи и иные виды поляризации.

Способность диэлектрика поляризоваться в электрическом поле характеризуется его диэлектрической проницаемостью ε , представляющей собой отношение электрического смещения D (заряд, отнесенный к единице площади) к напряженности электрического поля E :

$$\varepsilon = \frac{D}{E}. \quad (21)$$

Величину диэлектрической проницаемости можно представить как произведение $\varepsilon = \varepsilon' \varepsilon_0$, где ε' — относительная диэлектрическая проницаемость, а ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума («постоянная вакуума»):

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} [\phi/\text{см}].$$

Это значение ε_0 соответствует величине D в $\kappa/\text{см}^2$ и E в $\text{в}/\text{см}$. В дальнейшем изложении мы будем пользоваться значением относительной диэлектрической проницаемости, опуская прилагательное «относительная» и индекс, так же как в § 5.

Чем сильнее поляризуется диэлектрик, тем больше будет емкость изготовленного из него конденсатора, так как смещающиеся в диэлектрике заряды связывают часть зарядов на обкладках и позволяют увеличить общий заряд конденсатора при неизменных его геометрических размерах и при одном и том же значении напряжения, приложенного к обкладкам.

Величину диэлектрической проницаемости можно определить как отношение емкости C_1 конденсатора с данным диэлектриком к емкости C_0 конденсатора с теми же размерами, в котором это вещество заменено вакуумом:

$$\varepsilon = \frac{C_1}{C_0}. \quad (22)$$

При этом имеем для вакуума значение $\varepsilon = 1$. Для всех газов и паров (когда вещество находится в сильно разреженном состоянии и число зарядов в единице объема, способных смещаться и давать поляризацию, невелико) величина диэлектрической проницаемости близка к единице. Так, для сухого воздуха при 20°C $\varepsilon \approx 1,0006$. При отсутствии ионизации потери в газах очень малы, $\text{tg } \delta \approx 10^{-6}$.

Электронно-деформационная поляризация представляет собой смещение электронов в атомах диэлектрика в сторону положительной обкладки. При такой поляризации величина ε относительно мала и определяется величиной показателя преломления n :

$$\varepsilon = n^2. \quad (23)$$

Твердые и жидкие диэлектрики, обладающие только этим видом поляризации (неполярные), обычно имеют $\varepsilon \approx 2 \div 2,5$.

Время установления электронно-деформационной поляризации составляет около 10^{-15} сек, а потому ϵ не зависит от частоты (рис. 7, а). При повышении температуры ϵ снижается за счет расширения диэлектрика и уменьшения числа атомов в единице

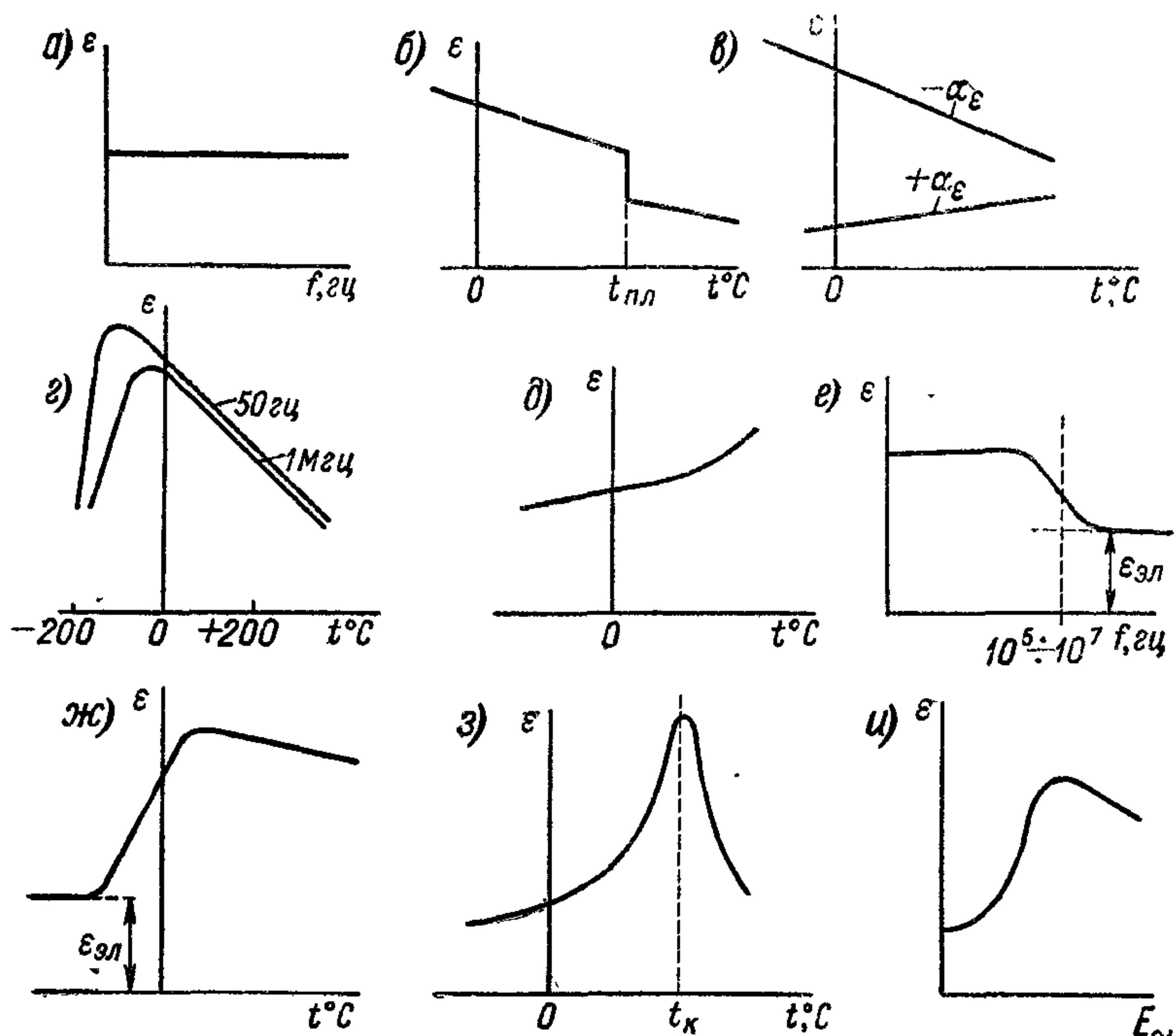


Рис. 7. Зависимость диэлектрической проницаемости от различных внешних факторов для диэлектриков с различными видами поляризации: а — электронно-деформационная поляризация: влияние частоты; б — то же, влияние температуры; в — ионно-деформационная поляризация, влияние температуры; г — электронно-релаксационная поляризация, влияние температуры и частоты; д — ионно-релаксационная поляризация, влияние температуры; е — дипольно-релаксационная поляризация, влияние частоты; ж — то же, влияние температуры; з — спонтанная поляризация, влияние температуры; и — то же, влияние напряжения.

объема, что ослабляет поляризацию. Температурный коэффициент ϵ :

$$\alpha_{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon} \frac{d\epsilon}{dt}. \quad (24)$$

Для жидких неполярных диэлектриков он составляет:

$$\alpha_{\epsilon} = - \frac{(\epsilon - 1)(\epsilon + 2)}{3\epsilon} \cdot \alpha_v, \quad (25)$$

где α_v — коэффициент объемного расширения жидкости.

Для твердых неполярных диэлектриков:

$$\alpha_{\varepsilon} = - \frac{(\varepsilon - 1)(\varepsilon + 2)}{\varepsilon} \cdot \alpha_{\text{л}}, \quad (26)$$

где $\alpha_{\text{л}}$ — коэффициент линейного расширения. При $\varepsilon \approx 2$ имеем $\alpha_{\varepsilon} \approx -2\alpha_{\text{л}}$. При расплавлении вещества объем резко возрастает и ε снижается скачком (рис. 7, б).

Диэлектрические потери в таких диэлектриках не связаны с процессом поляризации и обычно малы ($\text{tg } \delta \approx 10^{-4}$). Для конденсаторостроения неполярные вещества не очень удобны вследствие малого значения ε , но все же применяются достаточно широко, когда требуются малые потери, высокое удельное сопротивление и стабильность ε . В производстве конденсаторов применяют неполярные жидкости: нефтяное масло, жидкий полиизобутилен («октол»), жидкие полиорганосилоксаны («калория-2»), полужидкую массу — вазелин, твердые неполярные воскообразные вещества: парафин, церезин, синтетический церезин и неполярные синтетические пленки из полистирола, полиэтилена, полипропилена и политетрафторэтилена («фторопласт-4»).

И о н н о - д е ф о р м а ц и о н н а я п о л я р и з а ц и я представляет собой смещение ионов в узлах кристаллической решетки под действием электрического поля и проявляется в твердых кристаллических диэлектриках, кристаллы которых построены не из атомов, а из ионов. Время установления поляризации этого вида несколько больше, чем для электронно-деформационной поляризации, и составляет $10^{-12} - 10^{-13}$ сек, но все же достаточно мало для того, чтобы в рабочей области частот ε не зависела от частоты. Величина ε заметно увеличена и обычно лежит в пределах от 5—10 до 20—30. Повышение температуры приводит к увеличению поляризуемости ионов в связи с увеличением расстояния между узлами решетки при тепловом расширении вещества, поэтому ε увеличивается с ростом температуры и α_{ε} имеет положительный знак (α_{ε} до $+(100 \div 200) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$). В некоторых веществах такого типа, в частности, содержащих TiO_2 , наряду с ионно-деформационной поляризацией проявляется особо сильная электронно-деформационная, в связи с чем ε возрастает до величин порядка 100—150. В таких материалах за счет преобладания электронно-деформационной поляризации ε снижается с ростом температуры, т. е. α_{ε} имеет отрицательный знак (рис. 7, в). Величина α_{ε} доходит до $-(750 \div 1500) \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Ионно-деформационная поляризация характерна для многих высокочастотных керамических материалов с большим содержанием кристаллической фазы, широко применяемых в производстве керамических конденсаторов, а также для природного кристаллического материала — слюды. Последняя имеет малое значение α_{ε} , порядка $+10 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Для керамических материалов можно получать малые значения α_{ε} , смешивая компоненты

с положительным и отрицательным знаком α_ε . При смешении тонкоизмельченных компонентов, не вступающих между собой в химические реакции при последующем обжиге, величина ε получает промежуточное значение между величинами ε_1 и ε_2 , которые имеют компоненты:

$$\ln \varepsilon = x \ln \varepsilon_1 + (1 - x) \ln \varepsilon_2, \quad (27)$$

где x — относительное объемное содержание первого компонента.

Дифференцируя это выражение по температуре, получаем простое соотношение для величин температурных коэффициентов:

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{x}{\varepsilon_1} \frac{d\varepsilon_1}{dt} + \frac{(1-x)}{\varepsilon_2} \frac{d\varepsilon_2}{dt}$$

$$\alpha_\varepsilon = x (\alpha_{\varepsilon_1}) + (1-x) \alpha_{\varepsilon_2}. \quad (28)$$

Подбирая состав смеси, можно получить термокомпенсированную керамику, имеющую α_ε в пределах от 0 до $\pm(30 \div 50) \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Диэлектрические потери в материалах с ионно-деформационной поляризацией обычно не связаны с процессом поляризации и малы ($\text{tg } \delta \approx 10^{-4}$).

Электронно-релаксационная поляризация характеризуется ориентацией электрическим полем «избыточных» («дефектных») электронов в атомах кристаллической решетки, возбужденных тепловым движением. Этот редкий случай поляризации был открыт для материала, названного СВТ (стронций-висмут-титанат), и характеризуется высоким значением ε , порядка 900, при относительно небольших потерях ($\text{tg } \delta \approx 10^{-3}$). Характер зависимости ε от температуры и от частоты показан на рис. 7, г. В области положительных температур $\alpha_\varepsilon \approx -2000 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Этот материал применяется для изготовления керамических конденсаторов при ограниченных значениях рабочей частоты.

Ионно-релаксационная поляризация характерна для стекол и некоторых видов керамики, содержащих значительное количество стекловидной фазы, а также для аморфных оксидных пленок в электролитических конденсаторах. В этих материалах воздействие электрического поля вызывает определенную ориентацию в перемещениях ионов, находящихся в хаотическом тепловом движении, что создает эффект поляризации. Величина ε в таких материалах обычно порядка 5—15, но может достигать значений 30—40. Она слабо зависит от частоты и обычно возрастает при повышении температуры (рис. 7, д), причем значение α_ε может достигать величины порядка $\pm(300 \div 500) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Потери в материалах с этим видом поляри-

зации выше, чем при ионно-деформационной поляризации ($\operatorname{tg} \delta \approx \approx 10^{-3}$) и часто резко возрастают с ростом температуры. Как известно, стекло было первым диэлектриком, использованным для изготовления конденсаторов. Современное конденсаторостроение применяет этот материал в виде стеклопленки, стеклоэмали и стеклокерамики.

Д и п о л ь н о - р е л а к с а ц и о н н а я п о л я р и з а - ц и я (часто называемая просто дипольной) характерна для полярных жидкостей и представляет собой поворот дипольных молекул (диполей) под воздействием электрического поля. **Д и - п о л я м и** называют несимметрично построенные молекулы, у которых центры тяжести положительных и отрицательных зарядов сдвинуты к противоположным концам молекул, в связи с чем последние приобретают электрический момент, заставляющий их поворачиваться под действием электрического поля. Время установления дипольной поляризации составляет 10^{-5} — 10^{-7} сек, а потому в области радиочастот, порядка 10^5 — 10^7 гц, может наблюдаться снижение ϵ , обусловленное тем, что диполи не будут успевать поворачиваться при быстрых изменениях направления электрического поля (рис. 7, е). Дипольная поляризация связана с повышенными потерями, обусловленными трением молекул при их вращении ($\operatorname{tg} \delta \approx 10^{-3}$ — 10^{-2}).

Характер температурной зависимости ϵ для дипольной жидкости показан на рис. 7, ж. При низких температурах, когда жидкость замерзает, диполи не могут двигаться и имеет место только электронно-деформационная поляризация. При повышении температуры вязкость жидкости уменьшается, диполи приобретают способность поворачиваться и ϵ растет. Снижение ϵ в области положительных температур после прохождения через максимум объясняется тем, что усиливающееся тепловое движение препятствует правильной ориентации диполей под действием поля. В конденсаторостроении ряд дипольных жидкостей применяется в качестве пропиточных масс: касторовое масло, хлорированные и фторированные жидкости. Для них величина ϵ лежит в пределах 4—7.

Д и п о л ь н о - р а д и к а л ь н а я п о л я р и з а ц и я характерна для твердых веществ с относительно большими молекулами, содержащими полярные группы (дипольные радикалы), способные поворачиваться относительно основной молекулы под действием электрического поля. По характеру изменения ϵ с температурой и частотой подобные вещества напоминают собой дипольные (полярные) жидкости. Величина ϵ для таких материалов лежит в пределах 3—7, редко повышаясь до 10—20. Потери повышены ($\operatorname{tg} \delta \approx 10^{-3}$ — 10^{-2}) и так же, как у полярных жидкостей, заметно изменяются с температурой и частотой. В конденсаторостроении из этой группы веществ применяют полярные воскообразные материалы: галовакс, олеовакс, ланостерол и полярные пленочные материалы: эфиры целлюлозы (триацетат,

цианэтилцеллюлозу), полиэтилентерефталат («лавсан»), поликарбонат и др. К этой группе веществ относится также конденсаторная бумага, основа которой — целлюлоза представляет собой полярное высокомолекулярное природное вещество с дипольно-радикальной поляризацией, обусловленной наличием в молекулах целлюлозы полярных групп: —ОН.

С п о н т а н н а я (с а м о п р о и з в о л ь н а я) п о л я р и з а ц и я характерна для веществ, называемых сегнетоэлектриками и имеющих области самопроизвольной поляризации — «домены», в которых диполи (ионные пары) ориентированы в одном направлении еще до воздействия внешнего электрического поля. При этом в отдельных доменах направления ориентации не совпадают. Воздействие внешнего поля приводит к тому, что во всех доменах происходит переориентация диполей в направлении поля, что дает очень сильную поляризацию и весьма высокие значения ϵ , порядка 1000—10 000. Для этого вида поляризации характерна сильная зависимость ϵ от температуры с прохождением через максимум при температуре, называемой точкой Кюри (рис. 7, з). При температурах ниже точки Кюри наблюдается зависимость ϵ от напряженности электрического поля (рис. 7, и), характерная для сегнетоэлектриков и отсутствующая при всех прочих видах поляризации, которые мы рассмотрели выше. Спонтанная поляризация связана с большими потерями: $\operatorname{tg} \delta \approx 10^{-2} \div 10^{-1}$. В конденсаторостроении применяются сегнетокерамические низкочастотные материалы на основе титаната бария и других соединений.

М е ж д у с л о й н а я (м и г р а ц и о н н а я) п о л я р и з а ц и я характерна для ряда слоистых конструкций диэлектрика, применяемых в конденсаторостроении: в пропитанных бумажных, пленочных, комбинированных и т. п. конденсаторах. Для таких конструкций характерно наличие тонких прослоек жидкого диэлектрика между барьерами из твердого материала. Под действием электрического поля свободные ионы, содержащиеся в жидкости, могут перемещаться в пределах прослойки (зазора), скапливаясь у поверхности барьеров, что дает эффект поляризации. Относительно медленное перемещение ионов, особенно при высокой вязкости жидкости, приводит к исчезновению этого вида поляризации при относительно низких частотах, порядка 10^3 — 10^4 гц. При меньшей частоте эта поляризация проявляется в виде увеличения емкости обычно на несколько процентов или даже на доли процента. Этот вид поляризации может вызывать дополнительные потери в диэлектрике в области низких частот.

Таким образом, величина диэлектрической проницаемости ϵ , определяющая величину емкости конденсатора, в зависимости от типа диэлектрика и от свойственного ему вида поляризации, может меняться в широких пределах от 1 для газов до 10 000 и даже выше для сегнетоэлектриков.

§ 9. Зависимость емкости конденсаторов от температуры и от времени

Температурная зависимость емкости конденсаторов характеризуется величиной температурного коэффициента емкости (ТКЕ):

$$\alpha_C = \frac{1}{C} \frac{dC}{dt} \text{ [град}^{-1}\text{]}. \quad (29)$$

Если зависимость емкости от температуры носит линейный характер, то величину ТКЕ можно вычислять по формуле

$$\alpha_C = \frac{C_2 - C_1}{C_1 (t_2 - t_1)} \text{ [град}^{-1}\text{]}, \quad (30)$$

где C_1 — емкость при комнатной температуре t_1 (обычно $+15 \div +25^\circ \text{C}$); C_2 — емкость при повышенной или пониженной температуре t_2 (обычно при верхнем или нижнем пределе рабочей температуры конденсатора).

Если зависимость емкости от температуры носит нелинейный характер, то вычисление по формуле (30) дает только некоторое среднее значение ТКЕ. В этих случаях для характеристики качества конденсатора вместо ТКЕ часто указывают относительное изменение емкости при переходе от комнатной температуры к крайним пределам рабочей температуры:

$$\Delta C_t = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \cdot 100 \text{ [\%]}, \quad (31)$$

где обозначения те же, что и в формуле (30).

Характер зависимости емкости конденсатора от температуры обычно определяется характером температурной зависимости ϵ диэлектрика, разделяющего обкладки, т. е. величиной и знаком α_ϵ . Кроме того, зависимость емкости от температуры может быть обусловлена также особенностями конструкции конденсатора и изменениями его размеров при нагревании. Температурное расширение обкладок приводит к увеличению емкости, а увеличение толщины диэлектрика — к уменьшению емкости.

Представим себе плоский конденсатор с обкладкой в виде квадрата, сторона которого равна l . Согласно формуле (2), емкость такого конденсатора равна:

$$C = 0,0884 \frac{\epsilon l^2}{\delta} \text{ [нф]}, \quad (32)$$

где δ — толщина диэлектрика и ϵ — диэлектрическая проницаемость.

Дифференцируя это выражение по температуре, получаем:

$$\frac{dC}{dt} = 0,0884 \left(\frac{l^2}{\delta} \frac{d\epsilon}{dt} + \frac{\epsilon}{\delta} 2l \frac{dl}{dt} - \frac{\epsilon l^2}{\delta^2} \frac{d\delta}{dt} \right). \quad (33)$$

Разделив левую и правую части выражения (33) соответственно на левую и правую части выражения (32), имеем:

$$\frac{1}{C} \frac{dC}{dt} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{2}{l} \frac{dl}{dt} - \frac{1}{\delta} \frac{d\delta}{dt}$$

или

$$\alpha_C = \alpha_\varepsilon + 2\alpha_M - \alpha_\delta, \quad (34)$$

где α_ε — температурный коэффициент диэлектрической проницаемости диэлектрика; α_M — коэффициент линейного расширения металла обкладок; α_δ — коэффициент линейного расширения диэлектрика.

Если в качестве обкладок использован тонкий слой металла, нанесенный непосредственно на поверхность твердого диэлектрика (металлизированный конденсатор), то расширение обкладок будет определяться не расширением металла, а расширением диэлектрика. В этом случае можно положить $\alpha_M = \alpha_\delta$, и формула (34) принимает вид:

$$\alpha_C = \alpha_\varepsilon + \alpha_\delta. \quad (35)$$

Выражение (34) соответствует свободному расширению обкладок и диэлектрика при нагревании конденсатора. Если конструкция последнего такова, что свободное расширение не может иметь места, то при нагревании могут возникать такие деформации металла и диэлектрика, которые приведут к заметному отклонению фактического ТКЕ от его расчетного значения, полученного по формуле (34).

В выражении (34) для обычных металлов и сплавов величина α_M порядка $15 \div 30 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Величина α_δ имеет порядок $5 \div 10 \cdot 10^{-6}$ для неорганических и $50 \div 100 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ для органических диэлектриков. Поэтому значениями α_M и α_δ в формуле (34) можно пренебречь только в том случае, когда α_ε имеет значения, близкие к верхнему пределу, порядка $500 \div 1000 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ или выше.

Современная электроника во многих случаях требует применения конденсаторов с малой зависимостью емкости от температуры, т. е. с малым значением ТКЕ. Согласно формуле (34) для изготовления таких конденсаторов следует применять материалы с возможно меньшими значениями α_ε , α_M и α_δ . Наименьшие значения α_ε можно получать для газов, например, для сухого воздуха $\alpha_\varepsilon \approx -2 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Для твердых диэлектриков малые значения α_ε , менее $5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, можно получить для плавленого кварца, слюды и термокомпенсированной керамики. Наименьший коэффициент линейного расширения имеет плавленый кварц: $\alpha_\delta = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Для специальных металлических сплавов («инвар» и др.) получают $\alpha_M = 1 \div 5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Малые изменения емкости с температурой можно обеспечить также путем параллельного соединения двух секций с разными

диэлектриками, имеющих ТКЕ разного знака. Необходимые величины емкостей обеих секций (для получения результирующего ТКЕ, близкого к нулю) определяются выражениями:

$$C_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} C; \quad C_2 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} C, \quad (36)$$

где C — заданная емкость конденсатора, C_1 и C_2 — емкости обеих секций и α_1 и α_2 — значения ТКЕ этих секций.

Этот принцип термокомпенсации применяют при изготовлении слюдяных образцовых конденсаторов, используя для компенсации положительного ТКЕ слюды отрицательный ТКЕ малень-

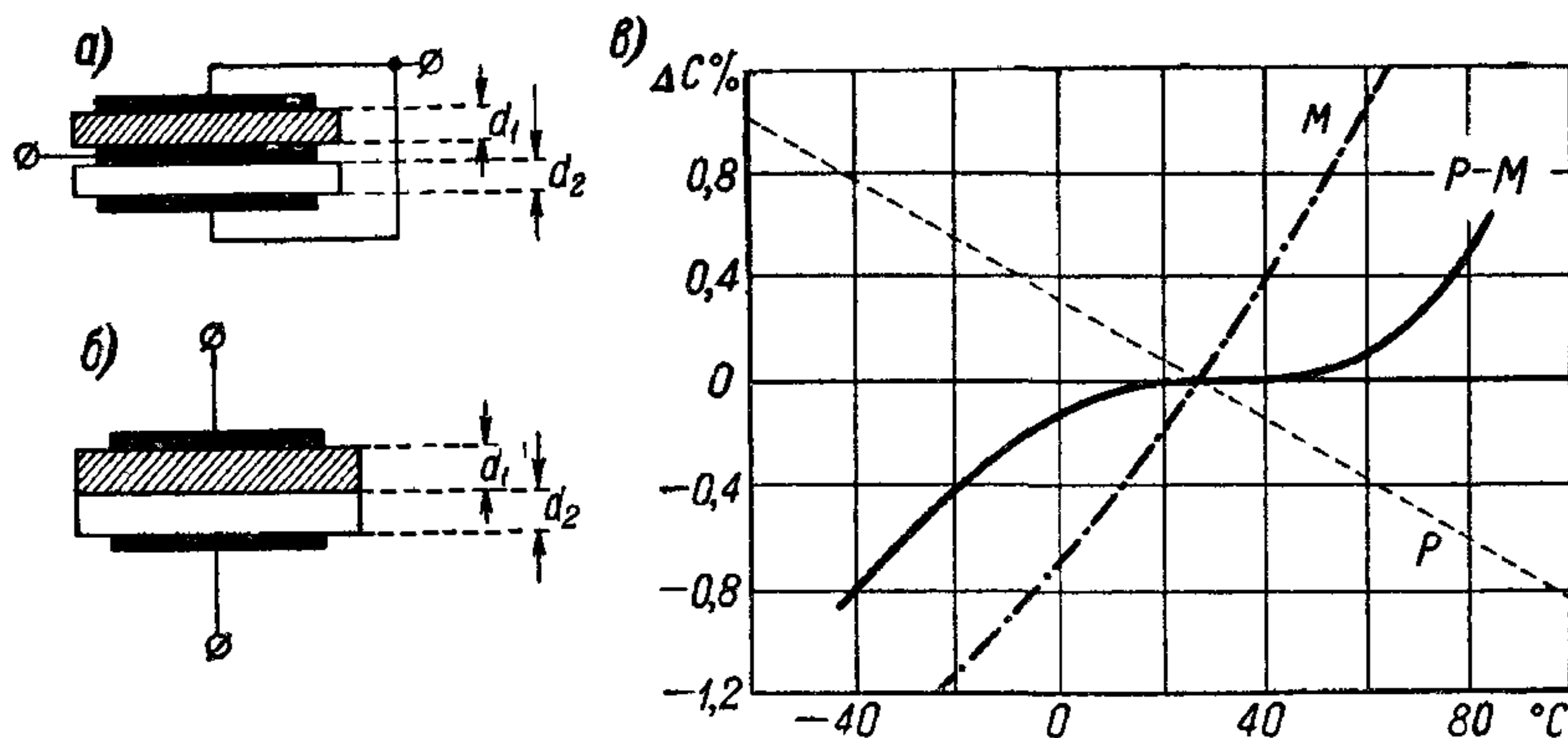


Рис. 8. Температурная компенсация изменений емкости конденсаторов: a — параллельное соединение слоев диэлектриков с разными значениями ТКЕ; b — последовательное соединение слоев; c — зависимость емкости от температуры для термокомпенсированного пленочного конденсатора: M — майларовая пленка, P — полистирольная пленка, $P-M$ — последовательное соединение этих пленок.

ких керамических конденсаторов, и при изготовлении пленочных намотанных конденсаторов, используя различный знак ТКЕ у полярных и неполярных синтетических пленок. Результирующий ТКЕ при параллельном соединении секций определяется выражением

$$\alpha = \frac{C_1}{C} \alpha_1 + \frac{C_2}{C} \alpha_2. \quad (37)$$

Иногда применяется и последовательное соединение секций с различным по знаку ТКЕ. В этом случае имеем:

$$\alpha = \frac{C}{C_1} \alpha_1 + \frac{C}{C_2} \alpha_2. \quad (38)$$

Соотношение между толщиной и ϵ слоев диэлектриков с разным знаком ТКЕ в намотанных конденсаторах при одной и той же площади обкладок для обоих слоев и результирующим ТКЕ,

равным нулю, для параллельного соединения (рис. 8, а) определяется формулой

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \frac{\alpha_1}{\alpha_2}, \quad (39)$$

а для последовательного соединения (рис. 8, б) формулой

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \frac{\alpha_2}{\alpha_1}. \quad (40)$$

Если хотя бы у одного из диэлектриков изменение ε с температурой отклоняется от линейного закона, то термокомпенсация может быть произведена только для одного какого-то значения температуры, а при других значениях температуры ТКЕ будет иметь небольшое положительное или отрицательное значение, отличное от нуля (рис. 8, в).

Здесь мы рассматривали только обратимые изменения емкости конденсаторов, вызванные изменениями температуры. Воздействие повышенных или пониженных температур может приводить также и к необратимым изменениям емкости. Необратимую нестабильность емкости обычно характеризуют величиной $\Delta C_{\text{ост}}$ — остаточным относительным изменением емкости (в % от исходного значения) после возвращения к исходной температуре для конденсатора, подвергавшегося нагреву, охлаждению или воздействию нескольких температурных циклов.

Необратимые изменения емкости обычно связаны с небольшими остаточными изменениями размеров конденсатора. У конденсаторов с органическим диэлектриком они обычно больше, чем в случае неорганических диэлектриков, так как для органических веществ коэффициент линейного расширения примерно на один порядок величины выше, что легче приводит к необратимому изменению размеров при колебаниях температуры, тем более, что жесткость органических материалов невелика и они склонны к пластическим деформациям.

Необратимые изменения размеров конденсатора являются также одной из основных причин изменения его емкости во времени при длительном хранении. Поэтому величина $\Delta C_{\text{ост}}$ после нагрева может часто давать некоторое представление о стабильности емкости во времени. Ниже указан порядок средних значений необратимых изменений емкости при длительном хранении (порядка одного года) для некоторых типов конденсаторов. Данные относятся к нормальным условиям хранения; предполагается, что проникновение влаги внутрь конденсатора исключено.

Значительные изменения ε с течением времени наблюдаются только у некоторых видов сегнетокерамики и могут приводить к заметному снижению емкости изготовленных из такого типа материала низкочастотных конденсаторов.

Тип конденсатора	Изменение емкости при длительном хранении, %
Воздушный образцовый, слюдяной образцовый (серебряный)	$\pm 0,01 \div 0,02$
Слюдяной опрессованный хорошего качества	$\pm 0,05 \div 0,10$
Керамический высокочастотный, стеклоэмалевый	$\pm 0,01 \div 0,05$
Полистирольный герметизированный	$\pm 0,1 \div 0,2$ (чаще «плюс»)
Бумажный герметизированный	$\pm (1 \div 2)$ (чаще «минус»)
Электролитический алюминиевый	$-(2 \div 10)$
Керамический низкочастотный (для некоторых типов керамики)	$-(10 \div 20)$

Другими факторами, влияющими на емкость конденсаторов, являются частота и напряжение. Зависимость емкости от действия этих факторов рассмотрена ниже (гл. III, § 19).

Глава II

КОНДЕНСАТОР В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 10. Зарядка конденсатора

Когда напряжение U прикладывается к конденсатору емкостью C , то между обкладками создается электрическое поле и в диэлектрике проходит ток смещения. Одновременно по проводникам, соединяющим обкладки с зажимами источника электроэнергии, проходит электронный ток, равный току смещения в диэлектрике (зарядный ток конденсатора). При этом конденсатор приобретает запас энергии, равный

$$A = \frac{CU^2}{2}, \quad (41)$$

где A — выражено в дж или вт·сек, C — в ф и U — в в.

Если активное сопротивление зарядной цепи (сопротивление соединительных проводников, обкладок, выводов и внутреннее сопротивление источника энергии) равно r (в ом), а индуктивность отсутствует, то в момент включения напряжения происходит бросок тока, величина которого (в а) равна:

$$i_0 = \frac{U}{r}; \quad (42)$$

далее ток постепенно спадает (рис. 9), стремясь к нулю согласно уравнению

$$i = i_0 e^{-\frac{\tau}{rc}}, \quad (43)$$

где τ — время в сек и e — основание натуральных логарифмов.

В то же время напряжение на выводах конденсатора U_C возрастает, асимптотически приближаясь к величине напряжения на зажимах источника электроэнергии U :

$$U_C = U \left(1 - e^{-\frac{\tau}{rC}} \right). \quad (44)$$

Предположим, что за время τ ток спадает до значения i_τ . Тогда энергия, затраченная на зарядку конденсатора, равная теплу, выделенному в сопротивлении r зарядным током, может быть найдена из выражения

$$A_{\text{зар}} = \int_0^\infty i_\tau^2 r d\tau. \quad (45)$$

Подставив значение $i_\tau = \frac{U}{r} e^{-\frac{\tau}{rC}}$ и произведя интегрирование, получаем:

$$A_{\text{зар}} = \frac{U^2}{r} \int_0^\infty e^{-\frac{2\tau}{rC}} d\tau = \frac{CU^2}{2}.$$

Иными словами, для того чтобы зарядить конденсатор (в цепи с чисто активным сопротивлением) до запаса энергии A , определяемого формулой (41), надо затратить такую же энергию на нагрев сопротивления зарядной цепи.

Рис. 9. Заряд конденсатора в цепи постоянного напряжения при отсутствии индуктивности.

Анализируя выражение (44), можно установить, что при соблюдении условия $\tau \ll rC$ в начальный период зарядки при малых временах напряжение на выводах конденсатора возрастает прямо пропорционально времени зарядки:

$$U_C = \frac{U}{rC} \tau. \quad (46)$$

Это позволяет использовать принцип зарядки конденсатора при изготовлении приборов для измерения малых промежутков времени (миллисекундомеров) путем измерения напряжения на обкладках конденсатора, заряжавшегося известным напряжением в течение неизвестного малого промежутка времени.

Если кроме сопротивления r в зарядной цепи имеется также индуктивность L , то характер кривых $i = f_1(\tau)$ и $U_C = f_2(\tau)$ будет определяться соотношением параметров зарядной цепи: r , L и C . При соблюдении условия

$$r \geq 2 \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (47)$$

(где r — в ом, C — в ф и L — в гн) изменения тока и напряжения носят аperiodический характер (рис. 10, а). Кривая $U_C = f_2(\tau)$ имеет тот же характер, что и при отсутствии индуктивности (рис. 9); кривая $i = f_1(\tau)$ начинается от нуля, проходит через

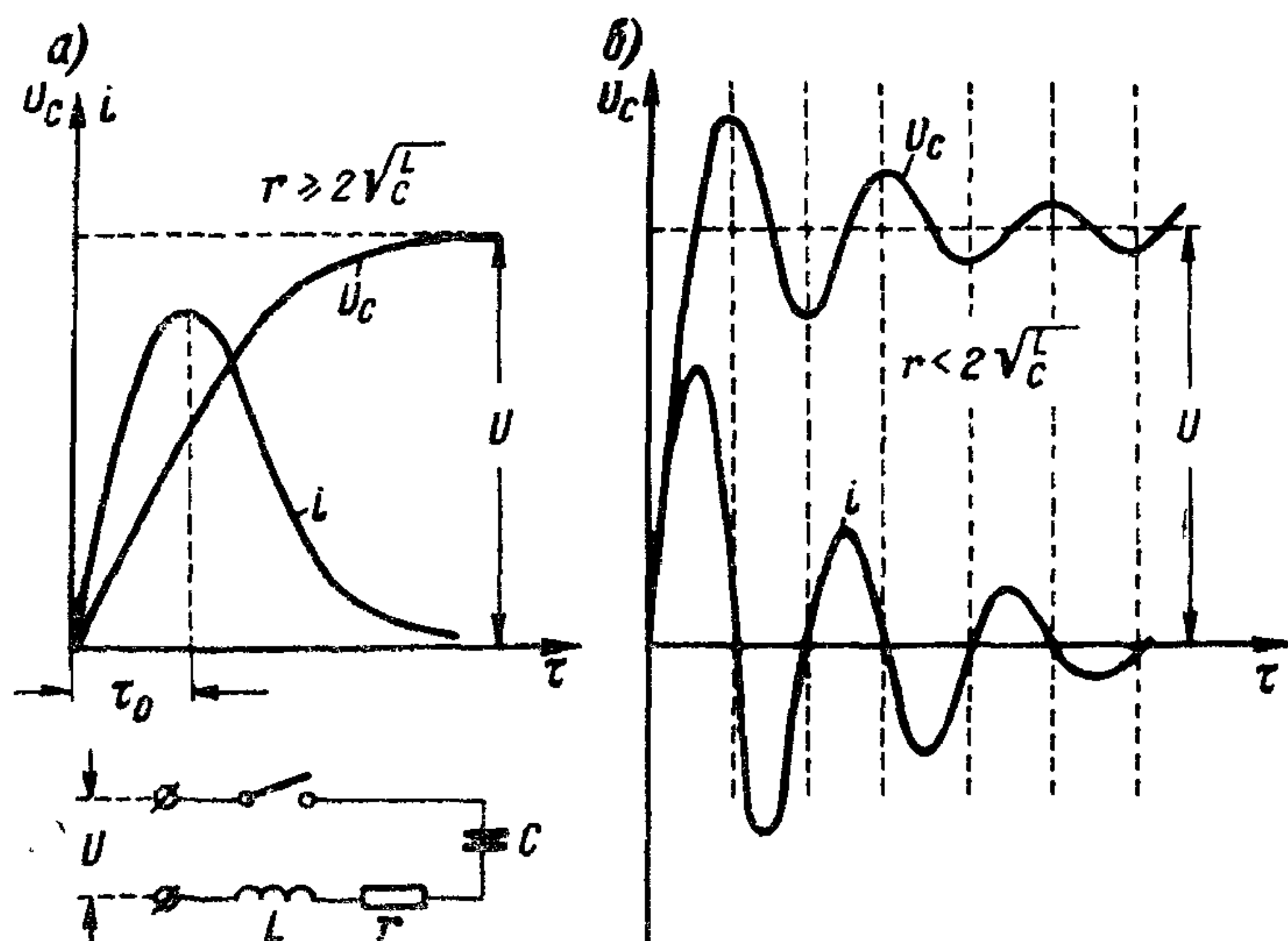


Рис. 10. Заряд конденсатора в цепи постоянного напряжения при наличии индуктивности: а — аperiodический процесс; б — периодический процесс.

максимум, а затем спадает, асимптотически приближаясь к нулю. Максимум тока достигается через промежуток времени

$$\tau_0 = \frac{2L}{r}, \quad (48)$$

где τ_0 — в сек, L — в гн и r — в ом.

Если условие (47) не соблюдено, то изменения U_C и i имеют периодический характер (рис. 10, б) и определяются уравнениями

$$i = \frac{U}{\omega_1 L} e^{-\alpha \tau} \sin \omega_1 \tau \quad (49)$$

и

$$U_C = U - \frac{U}{\omega_1 \sqrt{LC}} e^{-\alpha \tau} \sin (\omega_1 \tau + \varphi_K), \quad (50)$$

где

$$\alpha = \frac{r}{2L}; \quad \omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}} \text{ и } \varphi_K = \arctg \frac{\omega_1}{\alpha}.$$

Максимальная величина напряжения на зажимах конденсатора $U_{C_{\max}}$ может достигать значения $2U$. Для предотвращения опасных перенапряжений при включении конденсаторов в цепь,

содержащую индуктивность, следует увеличить r с таким расчетом, чтобы было соблюдено условие (47), т. е. чтобы не имел места периодический процесс.

Как указано выше, при зарядке конденсатора в цепи с апериодическим режимом в процессе зарядки в проводах теряется такая же энергия, какая накапливается в конденсаторе. Поэтому при использовании энергии конденсатора коэффициент полезного действия оказывается в целом не более 50%. В связи с этим в подобных случаях может оказаться полезным применение периодического процесса зарядки через индуктивность с таким расчетом, чтобы потери энергии при зарядке были снижены.

§ 11. Сопротивление изоляции конденсатора и постоянная времени

При зарядке реального конденсатора ток с течением времени спадает не до нуля, а до некоторого конечного значения — ток утечки $i_{\text{ут}}$. Величина тока утечки (тока сквозной проводимости) обычно обусловлена наличием в диэлектрике свободных ионов, перемещающихся сквозь толщу диэлектрика при воздействии электрического поля. Некоторые диэлектрики, кроме ионной проводимости, особенно в сильных полях, могут иметь также и электронную проводимость.

Поделив напряжение U , подведенное к конденсатору, на величину тока утечки, находим сопротивление изоляции конденсатора, т. е. величину сопротивления, оказываемого конденсатором прохождению постоянного тока:

$$R_{\text{из}} = \frac{U}{i_{\text{ут}}}, \quad (51)$$

где $R_{\text{из}}$ — в $M\Omega$, если U — в v и $i_{\text{ут}}$ — в mA .

Сопротивление изоляции доброкачественных конденсаторов весьма велико, а потому его выражают не в Ω , а в больших единицах: мегомах ($M\Omega$), гигамах ($G\Omega$) или терамах ($T\Omega$):

$$1 M\Omega = 1 \cdot 10^6 \Omega; \quad 1 G\Omega = 1000 M\Omega = 1 \cdot 10^9 \Omega;$$

$$1 T\Omega = 1000 G\Omega = 1 \cdot 10^{12} \Omega.$$

Сопротивление изоляции конденсаторов большой емкости определяется в основном током утечки через толщу диэлектрика, а потому зависит от удельного объемного сопротивления диэлектрика $\rho_{\text{об}}$, от площади обкладки S и от толщины диэлектрика d :

$$R_{\text{из}} = \rho_{\text{об}} \frac{d}{S} \cdot 10^{-6}, \quad (52)$$

где $R_{\text{из}}$ — в $M\Omega$, $\rho_{\text{об}}$ — в $\Omega \cdot \text{см}$, d — в см и S — в см^2 .

Умножая выражение (52) на величину емкости плоского конденсатора [формула (2)], выраженную в *мкф*, получаем:

$$R_{из}C = 0,884 \cdot 10^{-13} \rho_{об} \varepsilon = \tau_c. \tag{53}$$

Произведение сопротивления изоляции на емкость носит название постоянной времени конденсатора и выражается в *Мом · мкф*, в *ом · ф* или в *сек* ($ом \cdot ф = \frac{в}{a} \times \times a \cdot сек/в = сек$).

Тип конденсатора	Норма на величину постоянной времени при 20° С, сек	Верхний предел постоянной времени при тщательном изготовлении, сек
Полистирольный	5000	1 000 000
Фторопластовый	5000	1 000 000
Полиэтилентерефталатный	4000	100 000
Бумажный герметизированный	2000	10 000—20 000
Металлобумажный многослойный	1000	5000—10 000
Металлобумажный однослойный	200	500—1000
Танталовый электролитический жидкостный	300—500	2000—3000
Электролитический алюминиевый сухой	20	100—300

Постоянная времени конденсатора является основной характеристикой его качества при использовании конденсатора в цепи постоянного тока. Она не зависит от его формы и размеров и определяется только качеством диэлектрика. Для конденсаторов малой емкости сопротивление изоляции обусловлено не только объемным сопротивлением диэлектрика *R_{об}*, но и поверхностным сопротивлением *R_{пов}*, определяемым утечкой по закраинам конденсаторных секций, по поверхности выводных изоляторов и т. п.:

$$R_{из} = \frac{R_{об}}{1 + \frac{R_{об}}{R_{пов}}}. \tag{54}$$

При больших емкостях $R_{пов} \gg R_{об}$ и $R_{из} \approx R_{об}$; в этом случае мы можем пользоваться формулами (52), (53) и рассматривать величину τ_c как удобную характеристику качества конденсатора. При малых емкостях (обычно ниже 0,1—0,3 *мкф*) $R_{пов} < R_{об}$ и формула (52) уже не могут быть использованы для вычисления *R_{из}*. В этом случае качество конденсатора характеризуют уже не постоянной времени τ_c , а величиной *R_{из}*.

При зарядке реального конденсатора ток спадает со временем значительно медленнее, чем это следует из уравнения (43), соответствующего идеальному конденсатору. Это объясняется тем, что в реальном конденсаторе, наряду с нормальным зарядным током *i_н*, обычно существует аномальный зарядный ток (ток абсорб-

ции) i_a , обусловленный относительно медленным перемещением зарядов в толще диэлектрика (междуслойная поляризация и т. п.). Зависимость тока абсорбции от времени обычно можно выразить эмпирическим уравнением

$$i_a = f(\tau) = \sum_{i=1}^{i=n} a_i \tau^{-m_i}. \quad (55)$$

Кроме того, как отмечено выше, через диэлектрик реального конденсатора проходит ток утечки, определяемый сквозным движением ионов через толщу диэлектрика. Поэтому для полного зарядного тока реального конденсатора можно написать уравнение

$$i = i_n + i_a + i_{yt} = \frac{U}{r} e^{-\frac{\tau}{rC}} + \sum_{i=1}^{i=n} a_i \tau^{-m_i} + \frac{U}{R_{из}}. \quad (56)$$

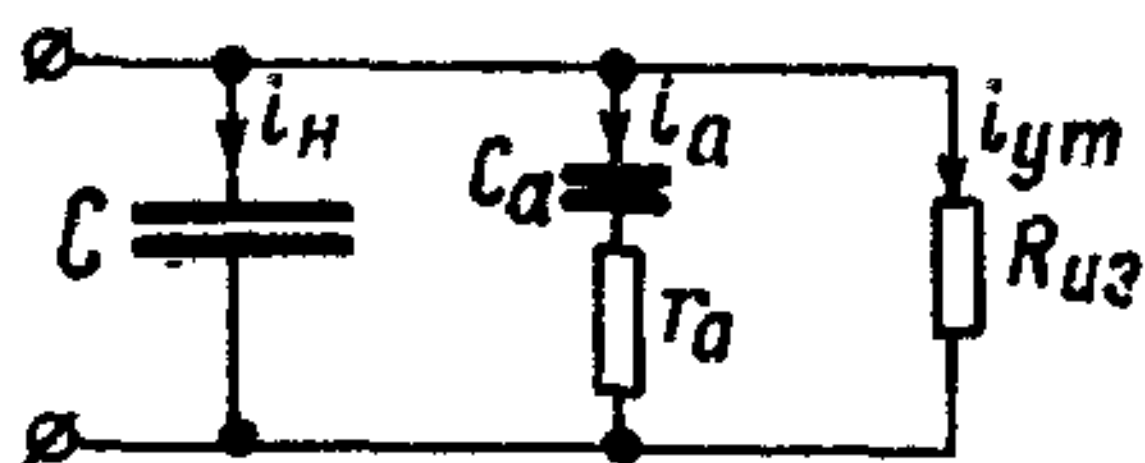
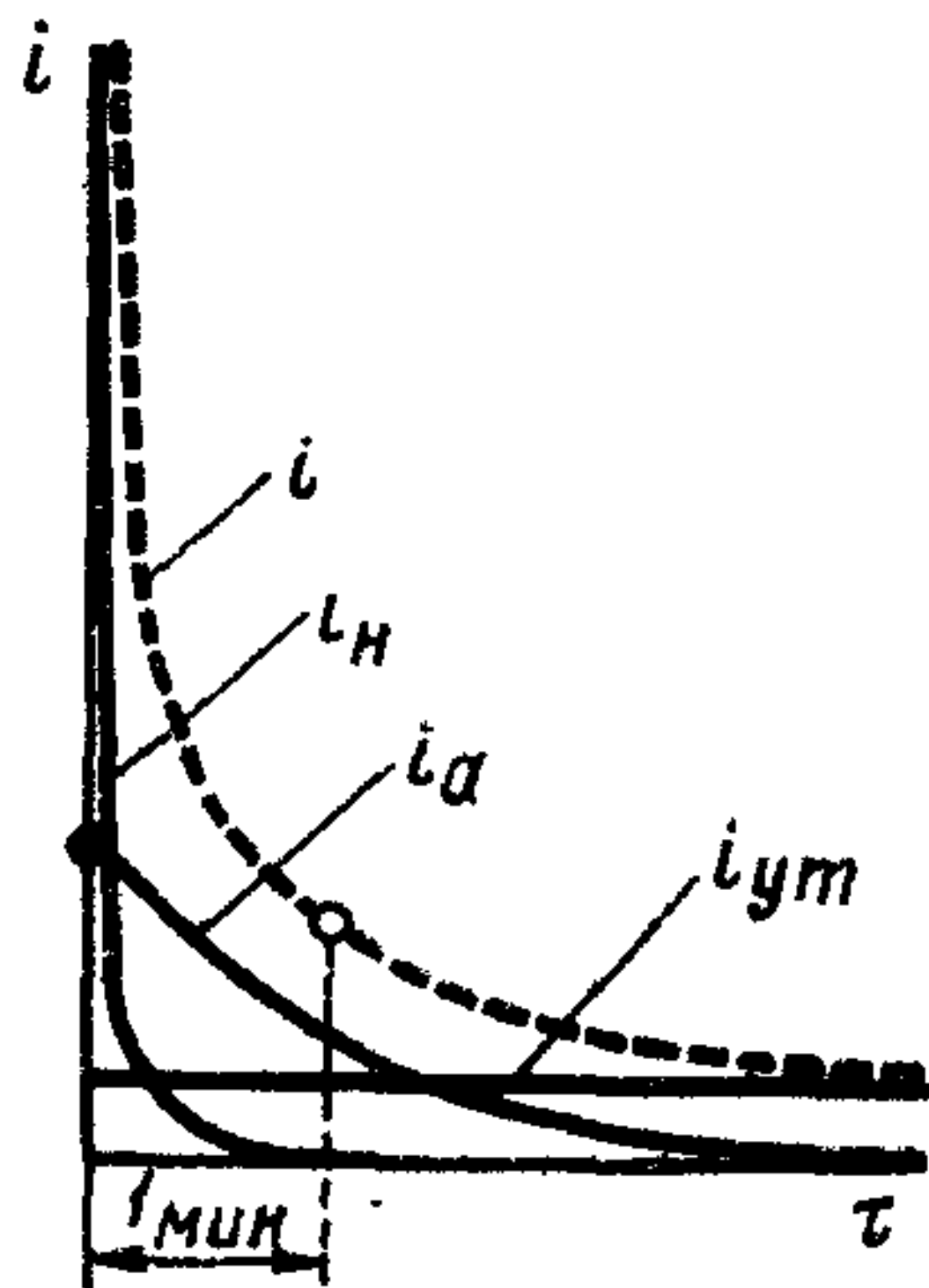


Рис. 11. Зависимость тока от времени при зарядке конденсатора (обозначения в тексте) и схема, эквивалентная конденсатору с абсорбцией.

Графическое изображение изменения во времени трех составляющих тока при зарядке конденсатора дано на рис. 11. Уравнению (56) соответствует эквивалентная схема, показанная в нижней части того же рисунка. Здесь C — емкость, обусловленная быстрой поляризацией (деформационной), устанавливающейся практически мгновенно (за $10^{-12} - 10^{-15}$ сек) и определяющей составляющую тока i_n ; время спада тока i_n определяется значениями C и r (емкостью и сопротивлением зарядной цепи); C_a — абсорбционная емкость, обусловленная замедленной поляризацией (релаксационной), определяющей составляющую тока i_a ; время спада

тока i_a определяется значениями C_a и некоторого фиктивного сопротивления r_a , формально характеризующего медленность спада тока i_a ; $R_{из}$ — сопротивление изоляции, соответствующее сквозному току утечки.

Строго говоря, схема на рис. 11 является упрощенной и вместо одной абсорбционной ячейки $C_a = r_a$ в ней надо использовать несколько, что и отражает знак суммы в формуле (55), показывающей спадание тока i_a со временем. Тем не менее, в первом приближении ею можно пользоваться для физического объяснения ряда явлений, происходящих в диэлектрике конденсатора, имеющего абсорбцию заряда.

Измерение сопротивления изоляции обычно производят, отсчитывая значение тока утечки через 1 мин после включения напряже-

ния на конденсатор. Это значение, при наличии явления абсорбции, много больше установившейся величины тока утечки, которая часто достигается не ранее, чем через 30—60 мин с момента включения конденсатора под напряжение.

Разделив напряжение на измеренное через 1 мин значение тока, мы получаем некоторое условное значение сопротивления изоляции, которое может быть заметно уменьшено по сравнению с величиной, вычисленной согласно формуле (51) по установившемуся току утечки. При измерении с малой выдержкой во времени, порядка 1—2 мин, мы фактически измеряем не ток утечки, а некоторое значение тока абсорбции (см. рис. 11).

Взяв для подсчета сопротивления изоляции несколько значений тока по кривой $i = f(\tau)$, можно построить кривую зависимости сопротивления изоляции от времени (рис. 12). Если напряжение, при котором производится измерение тока, относительно невелико (обычно его принимают равным 100 в), то наблюдается резкое возрастание сопротивления изоляции со временем (кривая 1) в соответствии с падающим характером зависимости тока от времени; если напряжение достаточно велико, во всяком случае больше номинального рабочего напряжения конденсатора, то возрастание сопротивления изоляции со временем замедляется и может даже смениться постепенным снижением (кривая 2 на рис. 12). Это снижение можно объяснить тем, что часть слабосвязанных ионов при повышении напряжения освобождается и увеличивает число свободных ионов, участвующих в сквозной проводимости. Известное значение может иметь также нагрев «слабых мест» в диэлектрике током утечки или начало ионизации остаточного воздуха, образующего газы вclusions в диэлектрике. Кроме того, при напряжениях, близких к пробивному напряжению, уменьшение $R_{из}$ может объясняться появлением в диэлектрике электронной проводимости.

При повышении температуры условия диссоциации облегчаются, количество свободных ионов в диэлектрике увеличивается и проводимость диэлектрика резко возрастает. В соответствии с этим сопротивление изоляции $R_{из}$ и постоянная времени τ_c всех типов конденсаторов резко снижаются при их нагревании (рис. 13).

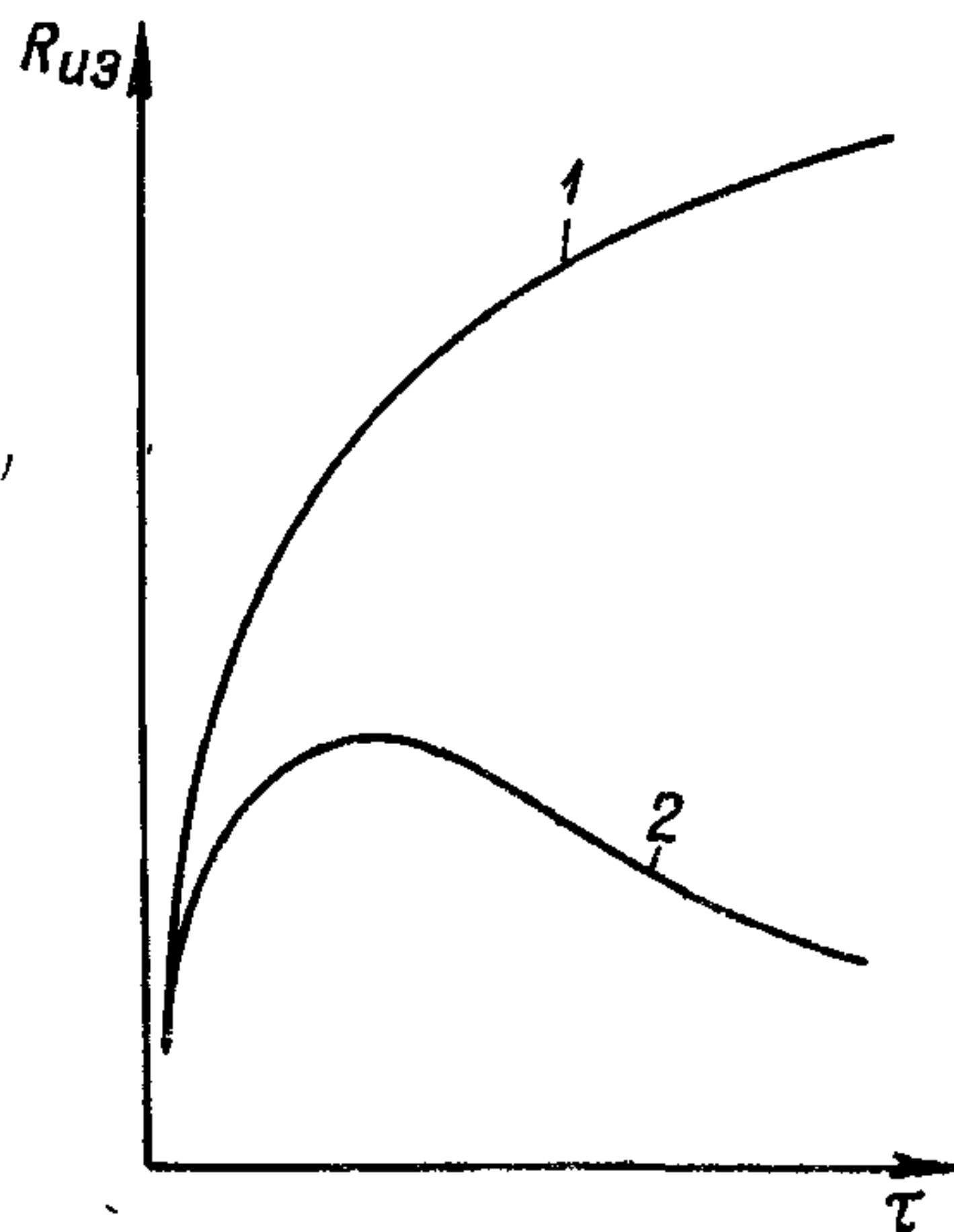


Рис. 12. Зависимость сопротивления изоляции бумажного конденсатора от времени воздействия напряжения.

1 — напряжение равно рабочему номинальному или ниже; 2 — напряжение значительно выше номинального.

Зависимость сопротивления изоляции конденсатора от температуры обычно может быть выражена эмпирической формулой

$$\lg R_2 = \lg R_1 - \beta (t_2 - t_1), \quad (57)$$

где R_1 — значение сопротивления изоляции в MOM при температуре t_1 ; R_2 — значение сопротивления изоляции при температуре t_2 .

Температурный коэффициент сопротивления изоляции β для конденсаторов с органическим диэлектриком имеет величину поряд-

ка 0,03—0,04, а для конденсаторов с неорганическим диэлектриком (в том числе и для электролитических) — порядка 0,01—0,015. Эти значения соответствуют измерению $R_{из}$ при времени выдержки 1 мин. При больших значениях времени выдержки значения β могут быть несколько повышены. Величина β может изменяться, когда диэлектрик изменяет свое агрегатное состояние (например, плавится) или, будучи аморфным веществом, начинает переходить в кристаллическую форму. В области низких температур наклон кривой $R_{из} = f(t)$ может резко уменьшиться, так как сопротивление изоляции будет определяться поверхностной утечкой, а не объемным сопротивлением диэлектрика.

Если емкость конденсатора изменяется с температурой не очень сильно, то формула (57) может быть использована и для выражения зависимости постоянной времени от температуры.

При значении $\beta = 0,03$ увеличение температуры на $10^\circ C$, т. е. в пре-

делах колебания комнатной температуры, изменяет величину $\lg R_{из}$ на 0,3, т. е. уменьшает $R_{из}$ в 2 раза. Поэтому при измерении $R_{из}$ необходимо точно фиксировать температуру помещения. Изменение температуры на $100^\circ C$ уменьшает $R_{из}$ примерно в 10^3 раз.

Резкая зависимость $R_{из}$ и постоянной времени от температуры затрудняет создание конденсаторов, предназначенных для работы при высоких рабочих температурах в цепях постоянного тока: это обусловлено не только резким возрастанием тока утечки до недопустимо больших пределов, но также возникновением опасности теплового пробоя (§ 34) и ускорением старения диэлектрика за счет усиления интенсивности электрохимических процессов (§ 36).

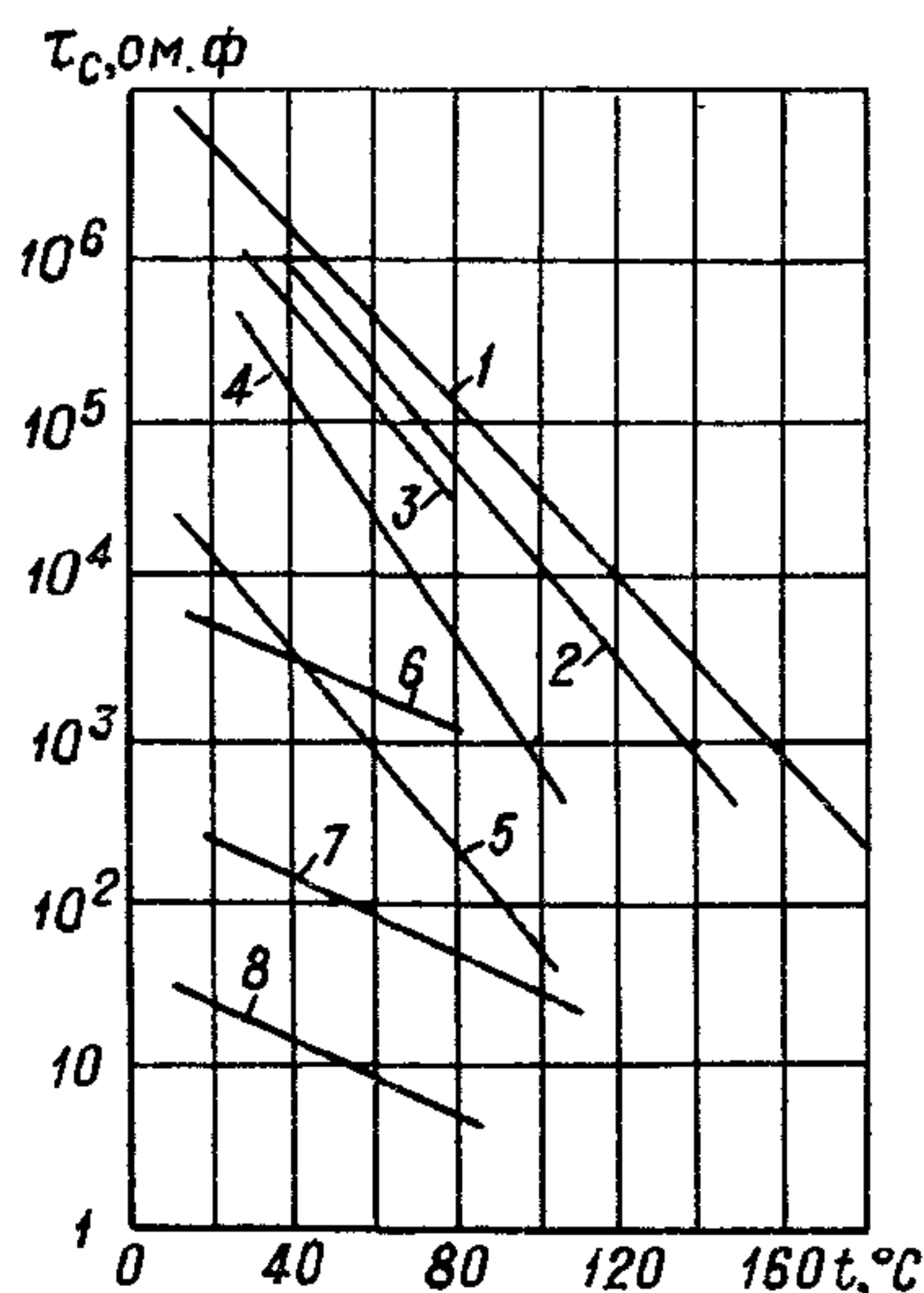


Рис. 13. Зависимость постоянной времени конденсаторов различных типов от температуры.

1 — фторопластовый; 2 — майларовый; 3 — полистирольный; 4 — полиэтиленовый; 5 — бумажный с неполярной пропиткой; 6 — слюдяной; 7 — электролитический сухой танталовый; 8 — электролитический сухой алюминиевый.

§ 12. Разряд конденсатора при отсутствии индуктивности

При замыкании обкладок заряженного конденсатора с емкостью C на сопротивление r энергия конденсатора, выраженная формулой (41), расходуется на нагрев сопротивления. Напряжение на выводах конденсатора при этом быстро снижается по закону

$$U_C = Ue^{-\frac{\tau}{rC}}, \quad (58)$$

где U — начальное значение напряжения в в, τ — в сек, C — в ф и r — активное сопротивление разрядной цепи в ом.

В данной формуле под величиной r надо понимать величину, учитывающую как внешнее сопротивление, на которое замкнут конденсатор (включая сопротивление соединительных проводников), так и его внутреннее активное сопротивление (обкладки, выводы, потери в диэлектрике).

Во время этого процесса, называемого разрядом конденсатора, ток сначала мгновенно достигает значения

$$i'_0 = \frac{U}{r},$$

где U — начальное значение напряжения, до которого был заряжен конденсатор. Затем ток спадает, подчиняясь уравнению (43), в котором под величиной r надо уже понимать сопротивление разрядной цепи, а не зарядной.

Используя принцип разряда конденсатора, можно при помощи зарядного источника малой мощности (т. е. с большим внутренним сопротивлением) получать кратковременные толчки разрядного тока большой величины путем разряда конденсатора на малое сопротивление. В этом случае значение тока i'_0 при разряде может быть во много раз выше значения начального зарядного тока i_0 (рис. 14).

Накопление энергии в конденсаторе для последующего ее использования путем кратковременного разряда конденсатора на малое сопротивление с получением мощного импульса тока находит себе все расширяющееся применение в технике. К ранее известным случаям применения накопительных конденсаторов (для генераторов импульсов тока — ГИТ — при испытании мощных выключателей, для радиолокационных

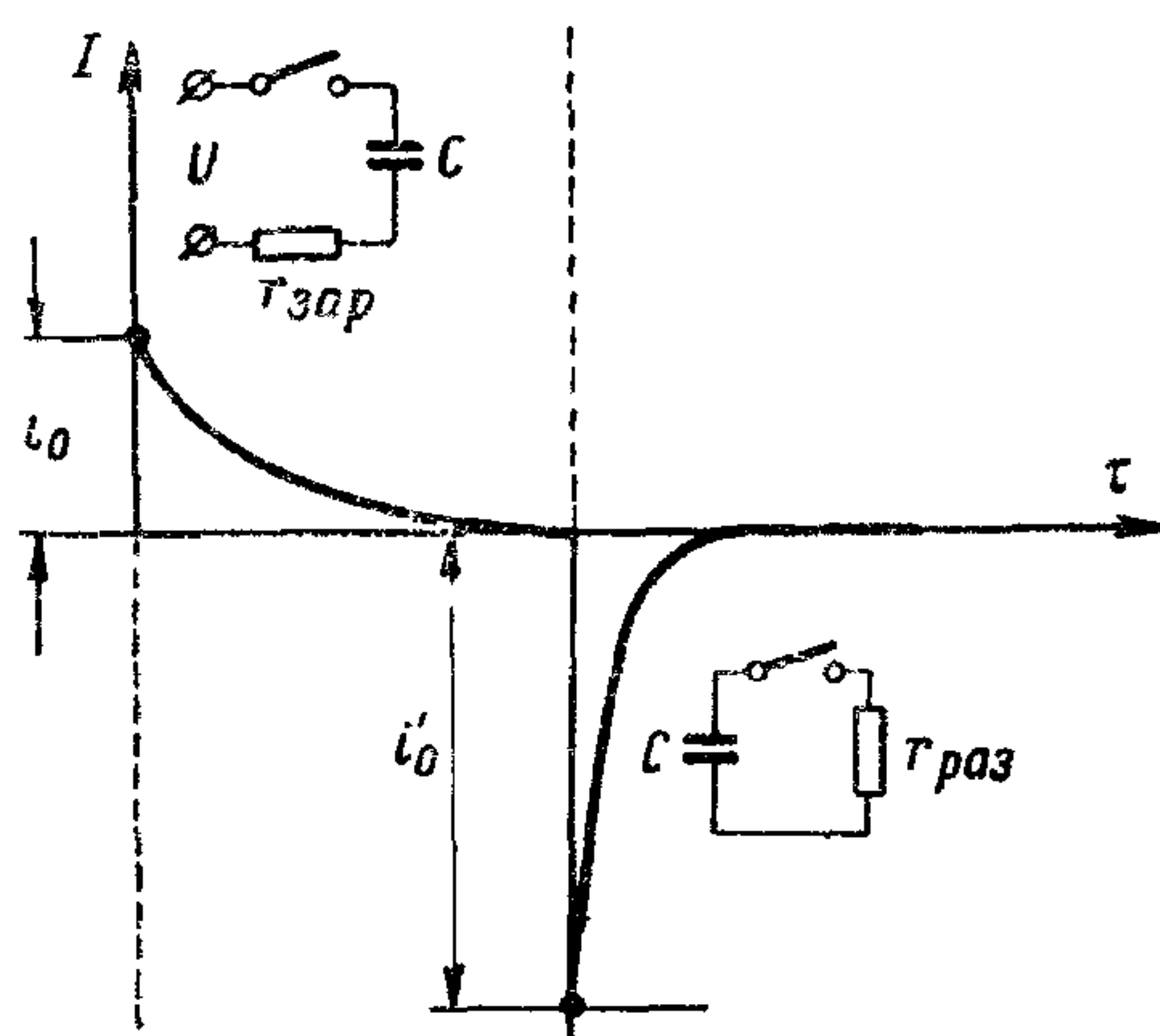


Рис. 14. Изменение тока в процессе заряда и разряда, когда сопротивление разрядной цепи меньше сопротивления в цепи заряда ($r_{раз} < r_{зар}$).

устройств, для электросварки, получения вспышки света при фотографировании, при работе «мигающих» маяков и т. д.) теперь добавились такие новые области, как использование электрогидравлического эффекта, использование магнитно-импульсного эффекта, образование и удержание плазмы при термоядерных реакциях и кванто-оптические генераторы (лазеры).

Используя энергию заряженного конденсатора, при его разряде надо иметь в виду, что общее сопротивление разрядной цепи будет равно:

$$r = r_{\text{н}} + r_{\text{вн}}, \quad (59)$$

где $r_{\text{н}}$ — наружное разрядное сопротивление, на которое замыкаются выводы конденсатора, а $r_{\text{вн}}$ — внутреннее сопротивление конденсатора. В связи с этим энергия конденсатора при разряде будет выделяться не только в сопротивлении $r_{\text{н}}$ (нагрузке), но и в сопротивлении $r_{\text{вн}}$:

$$A = \frac{CU^2}{2} = r_{\text{н}} \int_0^{\infty} i^2 d\tau + r_{\text{вн}} \int_0^{\infty} i^2 d\tau = A_{\text{н}} + A_{\text{вн}}.$$

Учитывая, что $\frac{A_{\text{н}}}{A_{\text{вн}}} = \frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{вн}}}$, находим значение энергии, которую можно использовать:

$$A_{\text{н}} = \frac{A}{1 + \frac{r_{\text{вн}}}{r_{\text{н}}}} = k_{\text{э}} A, \quad (60)$$

где коэффициент использования энергии, запасенной в конденсаторе (коэффициент полезного действия накопительного конденсатора):

$$k_{\text{э}} = \frac{1}{1 + \frac{r_{\text{вн}}}{r_{\text{н}}}}. \quad (61)$$

Для повышения $k_{\text{э}}$ необходимо добиваться максимального снижения внутреннего сопротивления конденсатора $r_{\text{вн}}$. Бумажные накопительные конденсаторы имеют $r_{\text{вн}} = 0,01 \div 0,1$ ом, металлобумажные — порядка 0,02—0,2 ом, а электролитические — порядка 0,1—0,5 ом.

При сопротивлении разрядной цепи $r_{\text{н}} = 0,5$ ом для электролитического конденсатора величина $k_{\text{э}}$ будет порядка 83—50%. Эти цифры соответствуют комнатной температуре; при охлаждении $r_{\text{вн}}$ для электролитического конденсатора резко растет и $k_{\text{э}}$ падает.

§ 13. Явление саморазряда

Если оставить обкладки заряженного конденсатора разомкнутыми, то с течением времени напряжение на его выводах все же будет постепенно снижаться. Это явление, называемое саморазрядом, обусловлено тем, что роль разрядного сопротивле-

ния тут играет сопротивление изоляции конденсатора $R_{из}$. Скорость снижения напряжения на выводах конденсатора в процессе саморазряда определяется постоянной времени конденсатора

$$U_C = Ue^{-\frac{\tau}{R_{из}C}} = Ue^{-\frac{\tau}{\tau_C}}, \quad (62)$$

где U и U_C — в в, а τ и $R_{из}C$ — в сек.

При $\tau = \tau_C$ имеем:

$$U_C = Ue^{-1} = \frac{U}{e} \approx 0,37U.$$

Таким образом, постоянная времени конденсатора численно выражается числом секунд, необходимых для того, чтобы напряжение на выводах конденсатора в процессе саморазряда упало до 37% от начального значения.

Ранее удавалось получать значения постоянной времени не выше 10^3 — 10^4 сек; в таких конденсаторах при саморазряде напряжение спадает до 37% начального значения примерно за 0,3—3 ч, т. е. они были непригодны для длительного хранения запасенной в них энергии. Теперь с появлением новых синтетических пленочных диэлектриков с очень высоким удельным сопротивлением (§ 82) стало возможным получать для специальных конденсаторов τ_C до 10^6 сек, что примерно соответствует 11,5 суткам. Такие конденсаторы очень удобны для применения в ряде областей новой техники, в частности в счетно-решающих устройствах.

Пользуясь выражением (62), можно определить сопротивление изоляции $R_{из}$, зная емкость конденсатора C и измерив значение напряжения U_C через τ сек от начала процесса саморазряда при зарядке конденсатора напряжением U :

$$R_{из} = \frac{\tau \lg e}{(\lg U - \lg U_C) C}, \quad (63)$$

где $R_{из}$ — в $M\Omega$ при C — в $\mu\kappa\phi$ и τ — в сек.

Конденсаторы с очень высокой постоянной времени (с очень малым саморазрядом) применяются для изготовления электрических дозиметров, используемых для измерения интенсивности радиации. В таких дозиметрах конденсатор заряжается определенным напряжением; выводы конденсатора соединены с электродами ионизационной камеры, между которыми в отсутствие излучения ток практически не протекает, так же как и через диэлектрик дозиметрического конденсатора, обладающего весьма малым саморазрядом. Если в пространстве, куда внесен дозиметр, имеется радиация, то между электродами в ионизационной камере будет проходить ток, разряжающий конденсатор. Снижение напряжения на конденсаторе за определенный промежуток времени может быть мерой интенсивности радиации в исследованном пространстве.

§ 14. Коэффициент абсорбции конденсаторов

При кратковременном замыкании заряженного конденсатора на малое сопротивление («накоротко») напряжение на его выводах спадает до нуля, но после размыкания обкладок может снова увеличиться до заметной величины за счет накопления на обкладках остаточного заряда. Это явление, свойственное конденсаторам с замедленной поляризацией (с абсорбцией), можно объяснить, пользуясь эквивалентной схемой рис. 11. При кратковременном замыкании полностью заряженного конденсатора «накоротко», точнее на малое сопротивление r , емкость C (основная часть емкости, обусловленная быстрой поляризацией) разрядится очень быстро, так как ее скорость разряда будет определяться произведением rC , где r — малая величина. За то же время емкость C_a (часть емкости, обусловленная медленной поляризацией, т. е. абсорбцией заряда) не успеет разрядиться, так как ее скорость разряда будет определяться постоянной времени $(r + r_a) \cdot C_a$, где $r_a \gg r$.

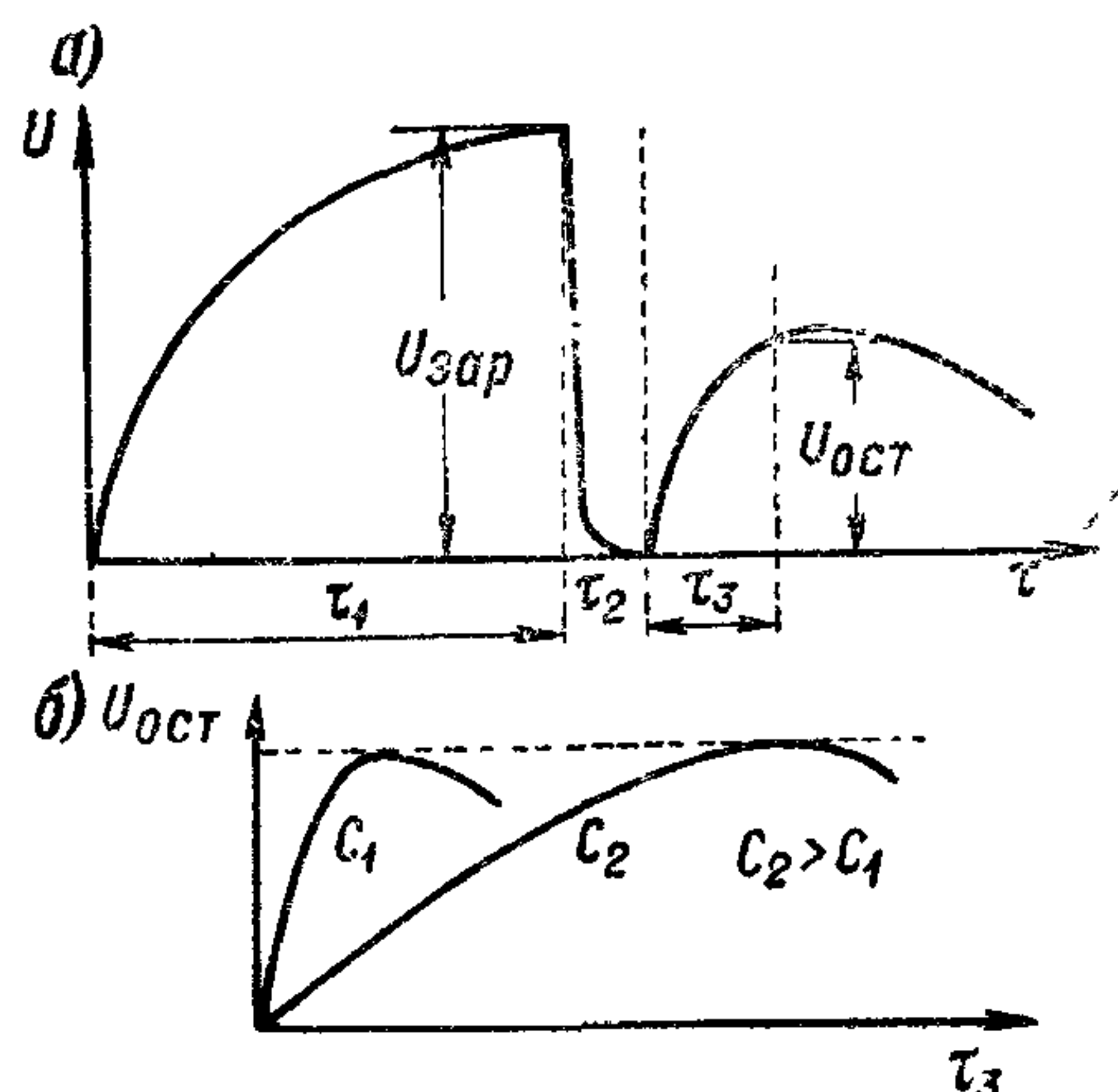


Рис. 15. К рассмотрению явления абсорбции: а — изменение напряжения на конденсаторе при определении коэффициента абсорбции; б — зависимость остаточного напряжения от времени при двух значениях емкости.

составит лишь некоторую часть зарядного напряжения и после достижения некоторого максимального значения будет постепенно спадать со временем (рис. 15) за счет саморазряда конденсатора, но в случае конденсаторов с высоким рабочим напряжением может все же представить опасность для обслуживающего персонала. Поэтому установки с бумажными конденсаторами высокого напряжения обычно снабжаются специальными разрядными сопротивлениями или другими разрядными устройствами, обеспечивающими нужную степень безопасности. Зарубежные фирмы часто изготавливают конденсаторы высокого напряжения с разрядными сопротивлениями, встроенными внутрь конденсатора.

При выборе разрядных сопротивлений обычно исходят из требования, чтобы за время не более 30 сек с момента отключения конденсатора напряжение на его выводах упало до безопасного значения 65 в.

Величина остаточного заряда характеризуется значением напряжения $U_{ост}$, появляющегося на выводах конденсатора (заряжавшегося напряжением $U_{зар}$ в течение времени τ_1 , кратко-временно разряженного замыканием «накоротко» в течение времени τ_2 и затем разомкнутого) через промежуток времени τ_3 после размыкания обкладок (рис. 15, а). Отношение этого напряжения к зарядному напряжению, выраженное в процентах, называют коэффициентом абсорбции конденсатора k_a , т. е.

$$k_a = \frac{U_{ост}}{U_{зар}} \cdot 100 \text{ [\%]}. \tag{64}$$

Величина k_a зависит от условий испытания и прежде всего от значений промежутков времени τ_1 , τ_2 и τ_3 . Время закорачивания обычно берут равным $\tau_2 = 2 \div 5 \text{ сек}$; при дальнейшем его увеличении величина k_a заметно снижается; увеличение времени τ_1 и τ_2 приводит к возрастанию k_a . Обычно указывают значения k_a при $\tau_1 \approx \tau_3 \approx 5 \div 15 \text{ мин}$. Для многих типов конденсаторов эти значения не дают правильного представления о максимальном возможном значении коэффициента абсорбции, которое может быть получено при длительной зарядке, порядка десятков часов, и таком времени τ_3 , которое соответствует получению максимума на кривой $U_{ост} = f(\tau_3)$.

Тип конденсатора	Величина k_a при $\tau_2 = 5 \text{ сек}$ и 20° C , в %	
	$\tau_1 = 15 \text{ мин},$ $\tau_3 = 3 \text{ мин}$	$\tau_1 = 25 \text{ ч},$ $\tau_3 = 5 \div 10 \text{ ч}$
Фторопластовый	0,01—0,05	0,05—0,10
Полистирольный	0,02—0,10	0,10—0,20
Полиэтилентерефталатный	0,2—0,8	1,7—2,5
Слюдяной	2—5	18—20
Бумажный обычный	0,6—2	30—32
Металлобумажный	2—5	39—41
Электролитические:		
алюминиевый сухой	5—6	15
танталовый жидкостный	0,6—2,5	7—8
танталовый оксиднополупроводни- ковый	2—5	9—10
Керамические:		
из массы Т150.	5	20—22
из массы Т900.	15	46—47

С увеличением емкости конденсатора скорость нарастания напряжения $U_{ост}$ уменьшается (рис. 15, б), а потому при небольших значениях времени τ_3 величина k_a кажущимся образом снижается. При достаточно больших значениях τ_3 величина k_a от емкости не зависит.

Величина коэффициента абсорбции представляет интерес не только с точки зрения техники безопасности, но и при использовании конденсаторов в ряде устройств измерительной и счетно-решающей техники, где появление остаточного заряда на конденсаторах может искажать работу устройства. В этом случае отдают предпочтение пленочным конденсаторам, которые имеют наименьшие значения k_a . Надо иметь в виду, что приведенные здесь значения k_a для пленочных конденсаторов соответствуют непропитанным образцам. Пропитка пленочного конденсатора увеличивает неоднородность диэлектрика и приводит к заметному увеличению величины k_a . С увеличением температуры величина k_a у всех типов конденсаторов обычно несколько возрастает.

Наименьшей абсорбцией, практически нулевой, обладают конденсаторы с газообразным диэлектриком, но малая величина их номинальной емкости часто заставляет исключить их из рассмотрения.

Теперь для ряда типов конденсаторов величина k_a вводится в технические требования или нормы. При этом надо строго оговаривать условия испытания, чтобы получать воспроизводимые значения этой характеристики.

Глава III

КОНДЕНСАТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 15. Разряд конденсатора при наличии индуктивности

В § 12 мы рассмотрели случай разряда конденсатора на некоторое активное сопротивление. При наличии в цепи разряда индуктивности L характер изменения напряжения и тока со временем будет зависеть от соотношения параметров цепи: C , L и r . Если соблюдено условие (47), то изменения будут аperiодические, подобные тем, которые имеют место при аperiодической зарядке в цепи, содержащей индуктивность (§ 10); если же условие (47) не соблюдено, то происходят периодические изменения тока и напряжения — з а т у х а ю щ и е к о л е б а н и я (рис. 16).

Затухание, т. е. уменьшение амплитуды колебаний со временем, характеризуется л о г а р и ф м и ч е с к и м д е к р е м е н т о м з а т у х а н и я Δ , который равен натуральному логарифму отношения двух смежных амплитуд тока и зависит от параметров разрядной цепи:

$$\Delta = \ln \frac{I_n}{I_{n+1}} \approx \pi r \sqrt{\frac{C}{L}}, \quad (65)$$

где r — в ом, L — в гн и C — в ф.

Частота колебаний при периодическом разряде определяется формулой

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}}. \quad (66)$$

Увеличение активного сопротивления r , в частности за счет потерь энергии в конденсаторе, увеличивает декремент затухания и уменьшает частоту колебаний.

Физическая сущность колебательного процесса при периодическом разряде заключается в переходе энергии заряженного конденсатора $CU^2/2$ в энергию магнитного поля катушки индуктивности $Li^2/2$ и обратно. Колебания постепенно затухают за счет поглощения энергии активным сопротивлением r . Принцип получения колебаний высокой частоты путем применения контуров, составленных из конденсаторов и катушек индуктивности, широко используется в радиотехнике. Как будет показано ниже, конденсатор всегда имеет некоторую собственную индуктивность, хотя и малую. Поэтому при разряде конденсатора на малое сопротивление r (при замыкании «накоротко»), могут возникнуть высокочастотные колебания, представляющие опасность для конденсатора. В связи с этим при разрядке конденсаторов после их испытания на пробой приложением постоянного напряжения рекомендуется замыкать их выводы на некоторое конечное сопротивление, а не «накоротко».

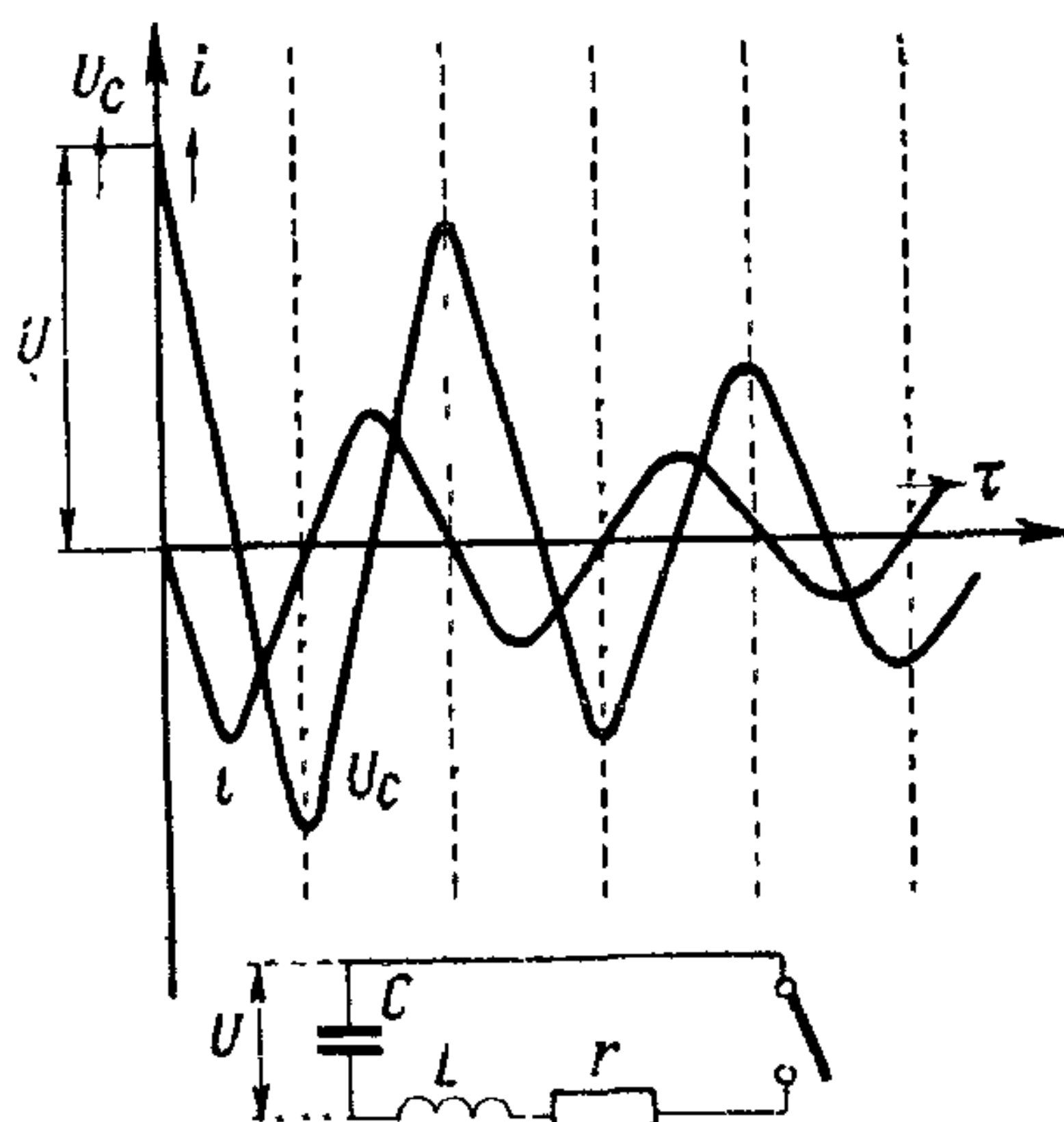


Рис. 16. Разряд конденсатора в цепи, содержащей индуктивность (затухающие колебания).

§ 16. Особенности прохождения переменного тока через конденсатор. Фильтровые и защитные конденсаторы

При включении конденсатора в цепь постоянного тока протекающий через него ток быстро спадает до очень малой величины $i_{\text{ут}}$. Практически можно считать, что конденсатор не пропускает постоянного тока. В этом случае сечение его обкладок может быть весьма малым.

В конденсаторе, включенном в цепь переменного тока, чередуются процессы зарядки и разряда (как например в случае колебательного процесса на рис. 16), обуславливающие протекание значительного тока через конденсатор. В этом случае уже приходится выбирать сечение обкладок таким образом, чтобы они могли выдержать ток, протекающий через конденсатор.

Если считать, что конденсатор представляет собой чистую емкость, т. е. не имеет ни индуктивности, ни активного сопротивле-

ния, то ток будет определяться реактивным (емкостным) сопротивлением конденсатора, которое равно:

$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}, \quad (67)$$

где x_C — в ом, f — в гц и C — в ф.

В этом случае при переменном напряжении U , приложенном к конденсатору, протекающий через него ток будет равен:

$$I = \frac{U}{x_C} = U\omega C = 2\pi f UC, \quad (68)$$

где I — в а при U в в.

При синусоидально изменяющемся напряжении, как известно, ток через чистую емкость опережает изменения напряжения на угол $\frac{\pi}{2}$:

$$u = \sqrt{2} U \sin \omega t; \quad i = \sqrt{2} I \sin (\omega t - \pi/2). \quad (69)$$

Из формулы (68) следует, что даже при небольшом напряжении и небольшой емкости ток, протекающий через конденсатор, может

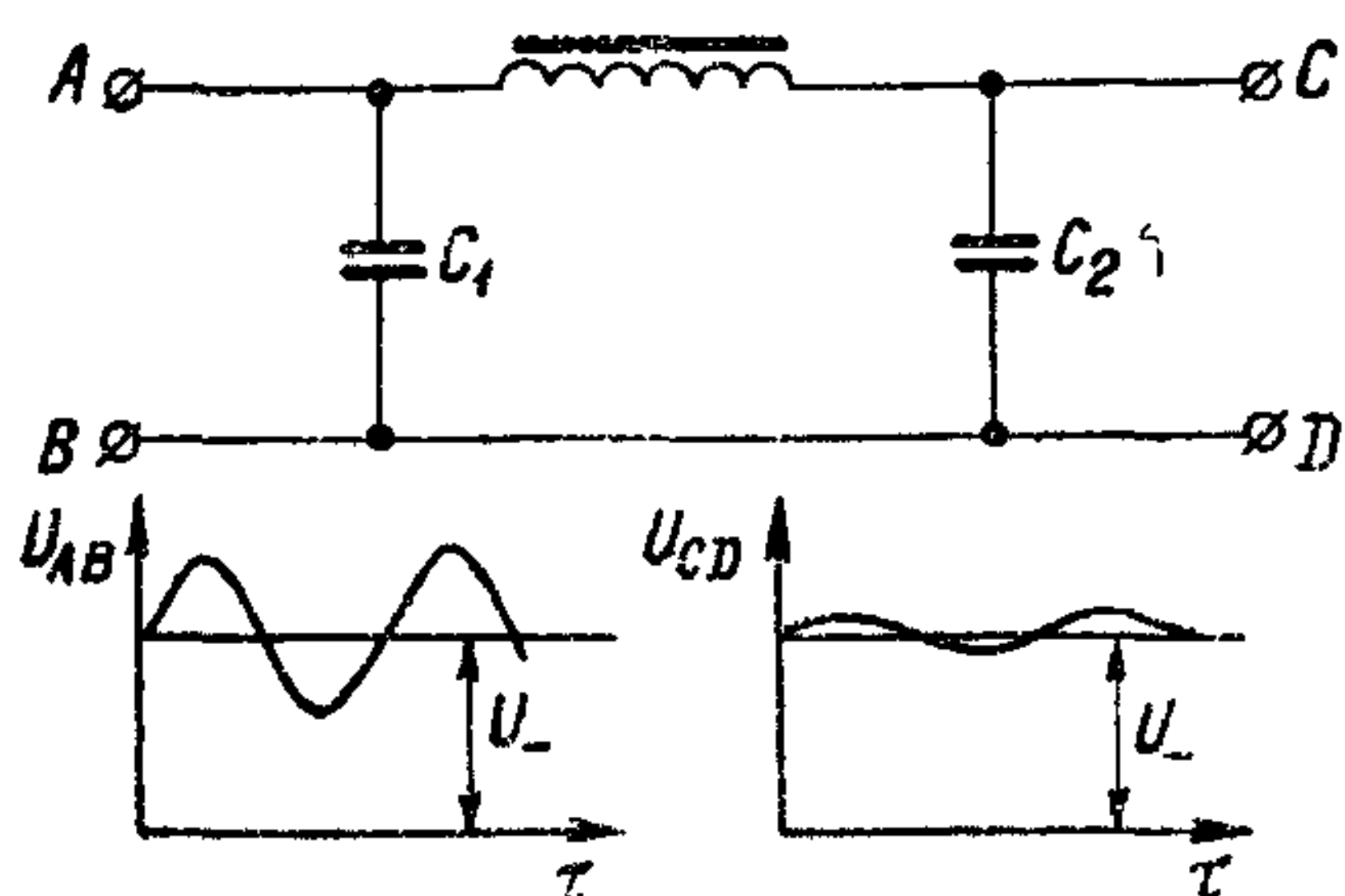


Рис. 17. Схема электрического П-образного фильтра и форма кривой напряжения на первом и втором фильтровых конденсаторах.

быть велик при высокой частоте, что следует учитывать при расчете высокочастотных конденсаторов.

То обстоятельство, что конденсатор, практически не пропускает постоянного тока, пропускает ток переменный, причем оказывает токам высокой частоты меньшее сопротивление, чем токам низкой частоты, используется в практике при изготовлении электрических фильтров. Такие фильтры часто применяются для

разделения постоянной и переменной составляющих выпрямленного напряжения. В обычно применяемой схеме П-образного фильтра (рис. 17) значительная часть переменной составляющей ответвляется в первый конденсатор C_1 , поскольку его сопротивление переменному току значительно меньше сопротивления катушки индуктивности L ; в то же время катушка индуктивности, в отличие от конденсатора, представляет малое сопротивление постоянному току. Вторым конденсатором фильтра C_2 служит для окончательного сглаживания кривой выпрямленного напряжения. При выборе и расчете фильтровых конденсаторов надо иметь в виду, что такие конденсаторы подвергаются в работе не только воздействию постоянного напряжения,

но и воздействию переменной составляющей выпрямленного напряжения, которая может иметь значительную величину, особенно на первом конденсаторе C_1 .

Электрические фильтры применяются также для разделения токов различной частоты, например, в аппаратуре высокочастотной проводной связи. В этом случае, в отличие от обычных фильтровых конденсаторов, служащих для сглаживания выпрямленного напряжения, от конденсатора надо требовать повышенных значений точности и стабильности емкости, чтобы обеспечить чистоту передачи.

Резкое снижение реактивного сопротивления конденсаторов с повышением частоты, согласно формуле (67), позволяет использовать их для подавления радиопомех, применяя конденсатор в качестве шунта, отводящего на землю высокочастотные токи помех (рис. 18). Применяемые для этой цели защитные конденсаторы должны быть рассчитаны на значительную силу тока, хотя их номинальное рабочее напряжение соответствует режиму работы при постоянном напряжении или напряжении низкой частоты.

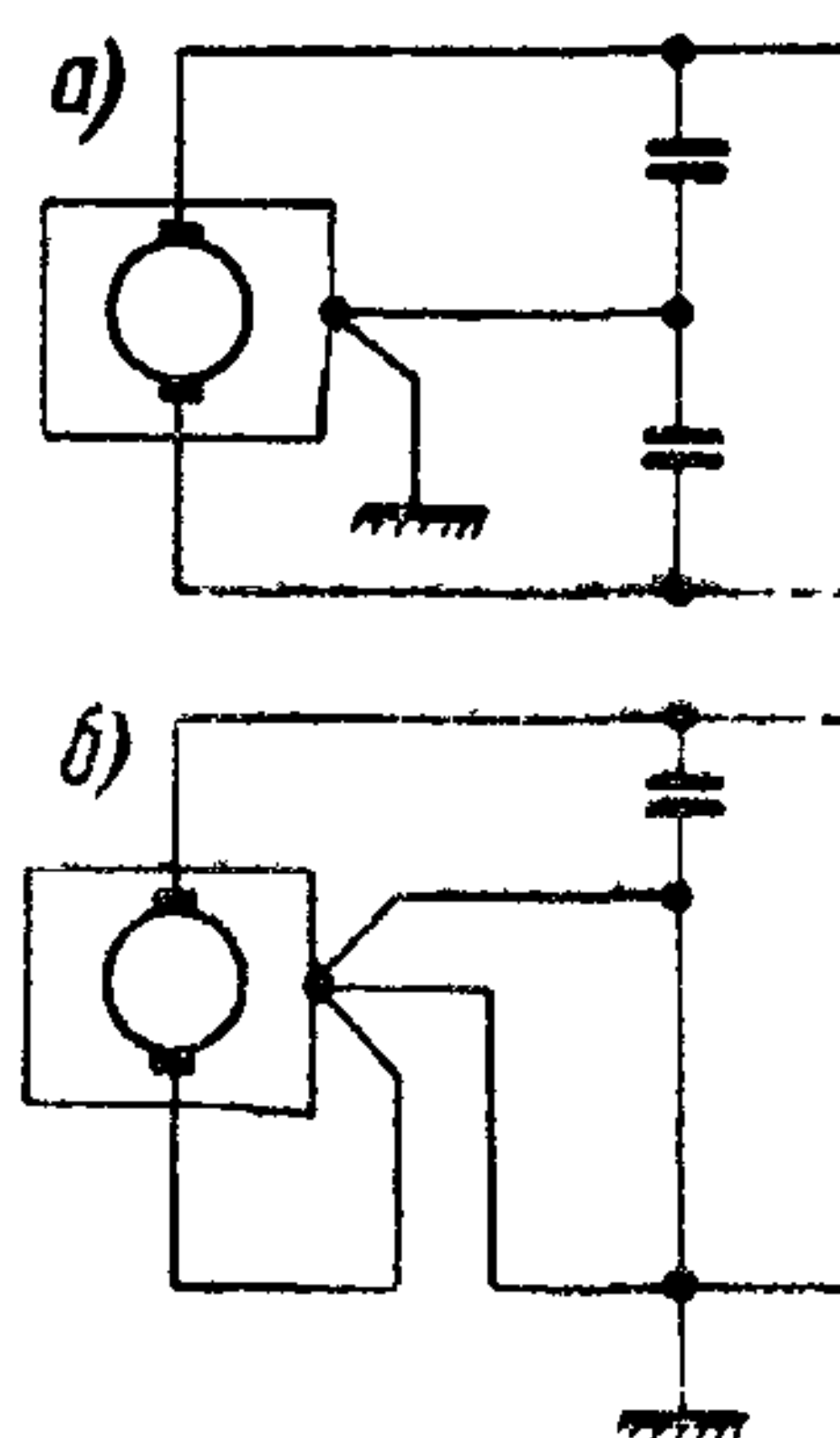


Рис. 18. Схема включения защитных конденсаторов для подавления помех, создаваемых коллекторной электромашиной: а — машина присоединена к незаземленной сети; б — машина присоединена к сети с заземленным проводом.

§ 17. Индуктивность конденсаторов и полное сопротивление

Применяя конденсаторы при высоких частотах, необходимо учитывать, что конденсатор имеет некоторое активное сопротивление r и некоторую собственную индуктивность L . Для того чтобы учесть наличие в конденсаторе r и L , кроме его емкости C , вместо реактивного сопротивления x_C надо пользоваться полным сопротивлением конденсатора

$$z = \sqrt{r^2 + (x_C - x_L)^2} = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}, \quad (70)$$

где z и r — в ом, L — в гн, и C — в ф.

Выражение (70) соответствует последовательной эквивалентной схеме конденсатора, предусматривающей последовательное включение C , r и L .

При увеличении частоты x_C снижается, а x_L растет; поэтому зависимость полного сопротивления конденсатора от частоты должна иметь U-образный характер (рис. 19). При частоте выше некоторого критического значения $f_{\text{рез}}$ (резонансная частота)

конденсатор ведет себя уже не как емкость, а как индуктивность:

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}. \tag{71}$$

Индуктивность конденсаторов обычно очень мала и ее выражают в микрогенри (мкгн), наногенри (нгн) или в сантиметрах (см):

$$1 \text{ мкгн} = 1\,000 \text{ см}; \quad 1 \text{ см} = 0,001 \text{ мкгн} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ гн} = 1 \text{ нгн}.$$

Порядок величин индуктивности для различных типов конденсаторов указан ниже. Здесь же приведены данные о максимальных значениях частоты, до которых величина индуктивности еще не оказывает существенного влияния на работу конденсатора.

Тип конденсатора	Индуктивность, нгн (см)	Максимальная частота, Мгц
Воздушный образцовый 100 пф.	10—20	2,5—3,6 *
Воздушный образцовый 1000 пф	30—50	0,8—1,2 *
Слюдяной образцовый 0,01—0,1 мкф	50—100	0,01 *
Керамический дисковый.	1—4	200—2000
Керамический трубчатый	3—30	50—200
Слюдяной опрессованный малых размеров	4—6	150—200
Слюдяной опрессованный средних размеров	15—25	75—100
Бумажный малых размеров (КБГ-И) . . .	6—11	50—80
Бумажный средних размеров	30—60	5—8
Бумажный больших размеров	100—1000	0,1—1
Малоиндуктивный бумажный импульсный конденсатор больших размеров	5—10	1—5

* Для образцовых конденсаторов указана частота, при которой изменение емкости не превосходит 0,1%. Во всех случаях верхнему пределу индуктивности соответствует нижний предел максимальной частоты и наоборот.

Ранее предполагали, что в намотанных (спиральных) конденсаторах большая индуктивность может быть обусловлена витками спирали. В связи с этим вместо обычной намотки (со с к р ы т о й ф о л ь г о й) была предложена «безындукционная» намотка (с в ы с т у п а ю щ е й ф о л ь г о й) (рис. 20). При такой намотке обкладки смещаются к противоположным торцам секции, что дает возможность замыкания «накоротко» всех витков спирали. Однако оказалось, что малые значения индуктивности можно получить и при обычной намотке, если располагать выводные контакты обеих обкладок возможно ближе друг к другу (рис. 21). Действительно, в намотанных конденсаторах со скрытой фольгой и вкладными контактами индуктивность в основном определяется длиной той части обкладок, которая заключена между выводными контактами.

В этой части конденсатора направления токов в обеих обкладках в каждый момент времени совпадают; магнитные поля этих токов складываются, и это обуславливает наличие индуктивности. В остальных частях конденсатора направления токов в обкладках противоположны, и их магнитные поля взаимно уничтожаются. Если между вкладными контактами имеется очень большой сдвиг, например, они вложены один в конце, а другой в начале обмотки, при достаточно большой длине обкладок, то индуктивность конденсатора может возрасти до больших значений, порядка тысяч и даже десятков тысяч сантиметром.

Преимуществом «безындукционной» намотки, в сравнении с обычной при совмещенных выводных контактах, остается уменьшение активного сопротивления обкладок, что дает некоторое снижение r при резонансе и уменьшает потери в конденсаторе, особенно при высоких частотах. Кроме того, припайка выводов непосредственно к выступающим с торцов конденсаторной секции краям обкладок дает резкое повышение надежности контакта по сравнению с вкладными контактами, применяемыми при обычной намотке (со скрытой фольгой). Это особенно важно, если конденсатор используется при малых напряжениях (ниже 1 в); в этих

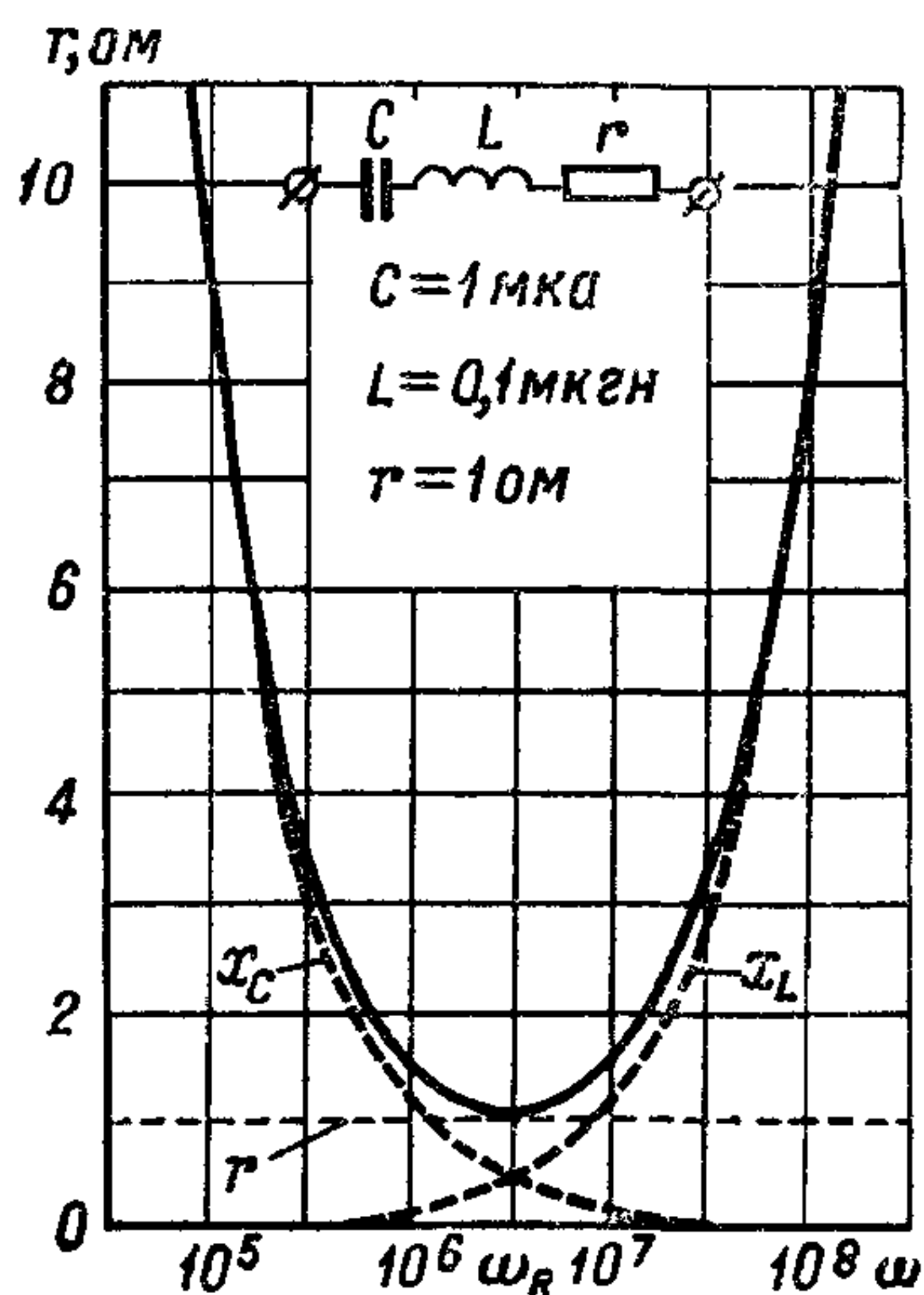


Рис. 19. Зависимость полного сопротивления конденсатора, имеющего индуктивность и активное сопротивление, от угловой частоты.

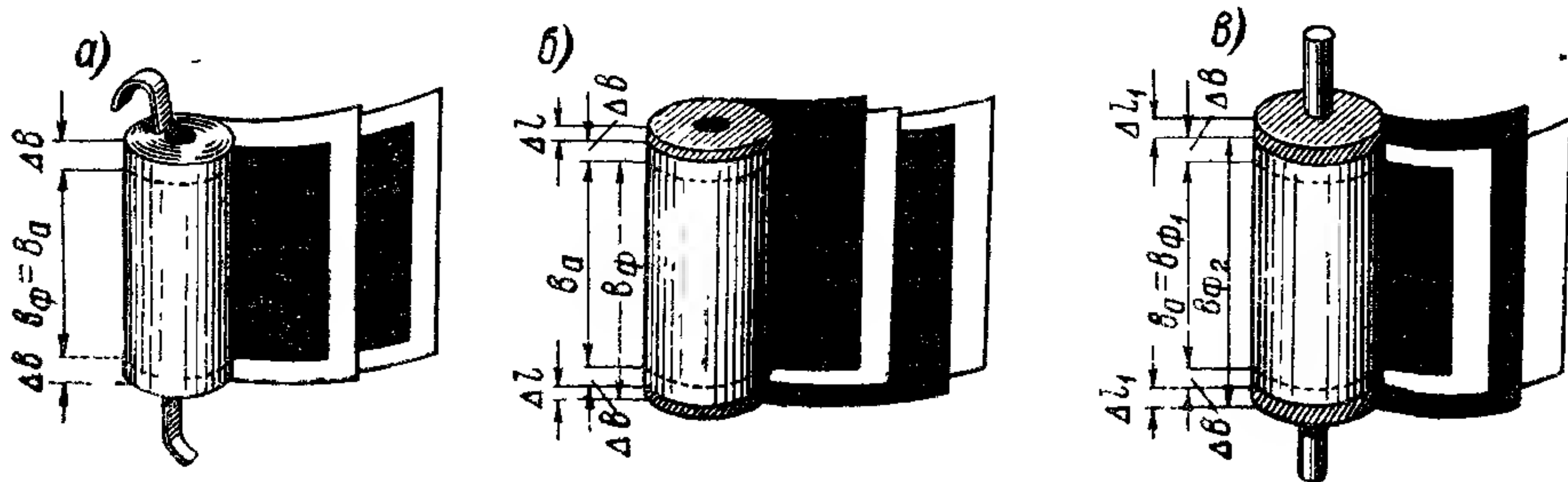


Рис. 20. Различные типы намотки спиральных конденсаторов: а — намотка со скрытой фольгой (обычная); б — намотка с выступающей фольгой (безындукционная); в — намотка с обкладками разной ширины (проходная); Δb — ширина закраины; Δl — ширина выступающего края фольги; b_a — активная ширина фольги; b_ϕ — полная ширина фольги.

случаях небольшое окисление поверхности вкладного контакта может привести к «обрыву» соединения между выводом и обкладкой (к потере емкости). Для увеличения надежности вкладного контакта при малых напряжениях его иногда приваривают или

припаивают к обкладке, но это вызывает технологические затруднения.

Недостатком «безындукционной» намотки является увеличенный вес фольги (обкладок) по сравнению с обычной намоткой, так как фактическая ширина фольги $b_{\text{ф}}$ должна быть больше активной ширины b_a , определяющей емкость конденсатора (см. рис. 20, б):

$$b_{\text{ф}} = b_a + \Delta b + \Delta l. \quad (72)$$

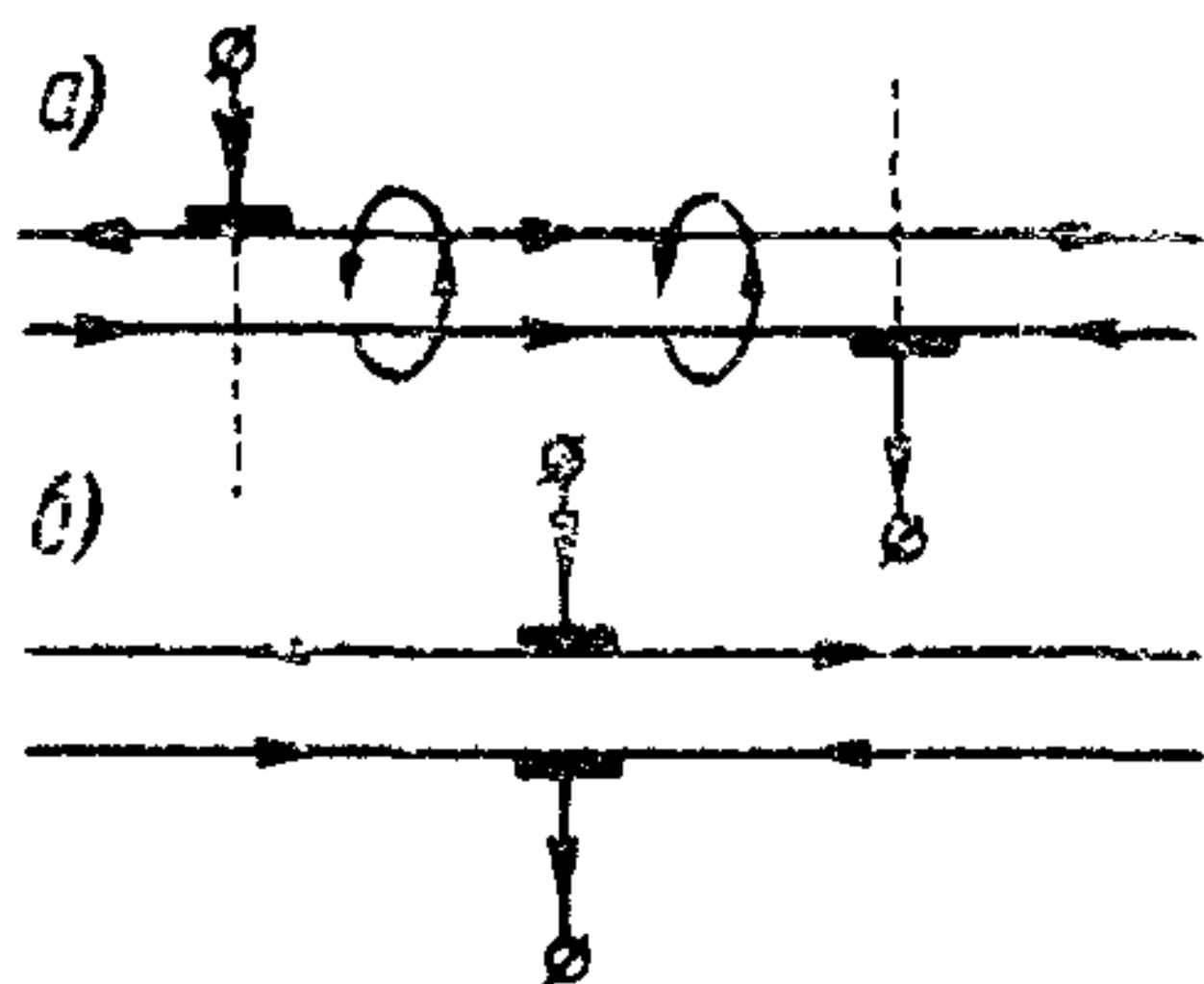


Рис. 21. Схема развертки спирального намотанного конденсатора: а — выводы сдвинуты; б — выводы совмещены.

При подсчете емкости по формулам (5)—(8) при намотке со сдвинутой фольгой надо, очевидно, подставлять в формулы значения активной ширины фольги b_a .

В процессе изготовления цилиндрических спиральных конденсаторов с обычной намоткой иногда оказывается целесообразным получать при намотке в одном конденсаторе несколько параллельно или последовательно соединенных секций. Для получения многосекционного конденсатора с параллельным соединением секций одна обкладка является общей для всех секций, а вторую в процессе намотки несколько раз обрывают, образуя отрезки, длина которых определяет емкости отдельных секций (рис. 22). Для последовательного соединения секций обрывы фольги приходится делать в соответствующих участках обеих обкладок.

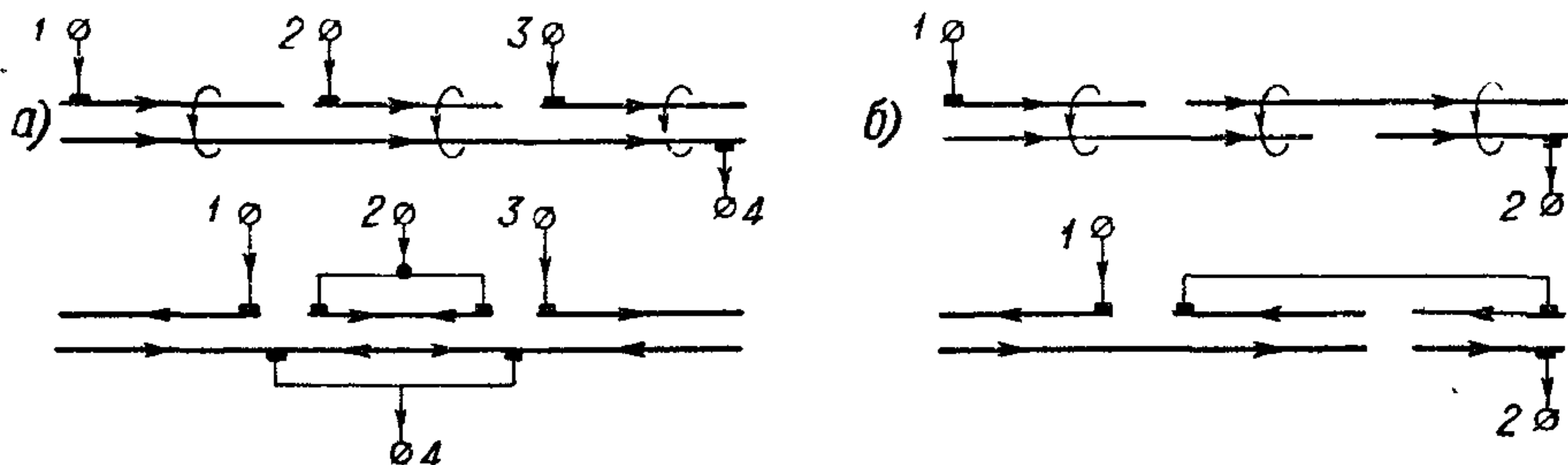


Рис. 22. Схемы развертки трехсекционных намотанных конденсаторов: а — параллельное соединение секций; б — последовательное соединение секций. Вверху — неправильное расположение выводов; внизу — правильное (минимальная индуктивность).

При этом необходимо уделить должное внимание расположению вкладных контактов, чтобы избежать резкого возрастания индуктивности и опасности появления индуктивной связи между секциями конденсатора. В частности, приходится ставить дополнительные контакты, иногда по два контакта на одну и ту же обкладку, чтобы обеспечить противоположность направления токов в разноименных обкладках по всей длине намотки. Следует иметь в виду,

что при последовательном включении индуктивностей они складываются, а при параллельном включении складываются их обратные значения; поэтому при сборке конденсатора из ряда параллельно соединяемых секций индуктивность его будет меньше, чем индуктивность отдельных секций. Это является одним из способов снижения индуктивности высоковольтных импульсных конденсаторов, используемых в качестве накопителей энергии.

При использовании конденсаторов для подавления радиопомех значительное повышение общей индуктивности приходится за счет проводников, при помощи которых защитный конденсатор присоединяется к линии, несущей токи помех. Индуктивность прямоли-

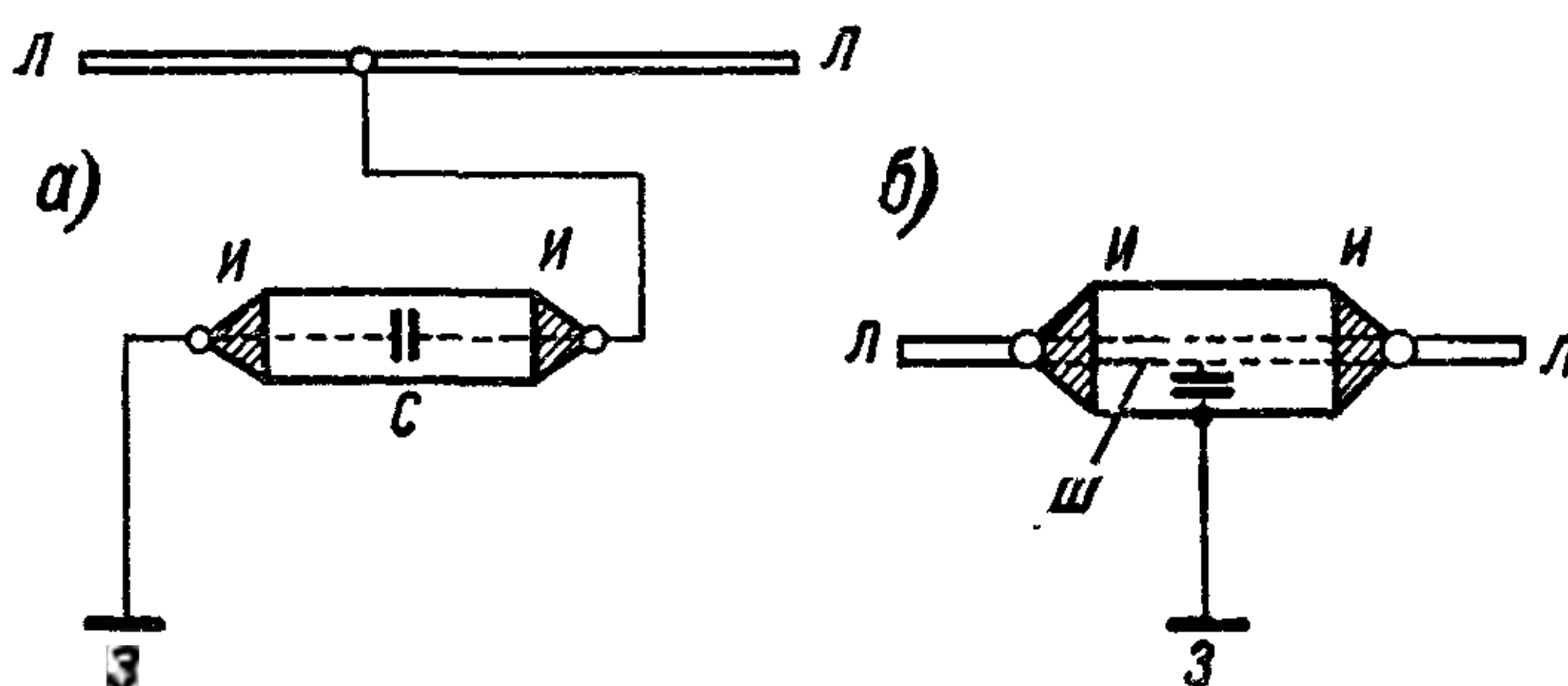


Рис. 23. Присоединение защитных конденсаторов к линии, несущей помехи: а — обычный защитный конденсатор; б — проходной конденсатор; Л — линия, несущая помехи; И — выводной изолятор; Ш — шинка; З — земля, С — емкость конденсатора;

нейного проводника длиной l , с диаметром сечения d при высокой частоте можно вычислить по формуле

$$L = 2l \left(2,3 \lg \frac{4l}{d} - 0,75 \right) - \frac{l}{2}, \quad (73)$$

где L , l и d в см. Например, для проводника длиной 0,5 м и диаметром 1 мм индуктивность составляет 685 см, или 0,685 мкГн, что значительно превышает собственную индуктивность большинства типов конденсаторов.

Для того чтобы свести к минимуму индуктивность соединительных проводов, применяются специальные проходные конденсаторы. В таких конденсаторах имеется внутреннее отверстие, сквозь которое пропускается медная шинка; к ней присоединяется один вывод конденсатора, а второй подключается к корпусу. Шинка изолируется от корпуса конденсатора и включается в разрыв защищаемой линии; корпус конденсатора присоединяется к земле (рис. 23). Емкость таких конденсаторов надо измерять между любым из изолированных выводов (т. е. любым концом шинки) и корпусом. В таком конденсаторе соединительные провода имеют минимальную длину (от торцов конденсаторной

секции до шинки и до корпуса) и создают весьма малую индуктивность. В конденсаторе с проходной фольгой (рис. 20, в) отсутствует вывод от обкладки до шинки, так как выступающие с торцов края широкой обкладки непосредственно припаяны к шинке (узкая обкладка присоединена к корпусу); это дополнительно снижает индуктивность и повышает резонансную частоту.

Заметное влияние активного сопротивления и индуктивности конденсатора на величину его полного сопротивления z обычно наблюдается лишь при частотах не ниже 10^5 — 10^6 гц (исключение представляют электролитические конденсаторы, в которых одной из обкладок служит электролит, что резко увеличивает r — гл. XIII).

При меньших частотах для вычисления тока, проходящего через конденсатор, вместо формулы

$$I = \frac{U}{z}, \quad (74)$$

где U — в в, z — в ом и I — в а, можно пользоваться приближенной формулой (68), учитывающей только одно емкостное сопротивление конденсатора.

§ 18. Кажущаяся и реактивная мощность конденсатора. Включение конденсаторов в цепь переменного тока

При использовании конденсаторов в технике сильных токов при низкой частоте, а также в контурах мощных радиопередатчиков и электротермических установок при высокой частоте приходится встречаться со следующими обозначениями мощности:

$$\text{кажущаяся мощность} \quad P = UI; \quad (75)$$

$$\text{реактивная мощность} \quad P_R = UI \sin \varphi; \quad (76)$$

$$\text{активная мощность} \quad P_A = UI \cos \varphi. \quad (77)$$

Выражая U в кв и I в а, получаем: P — в киловольтамперах (квa), P_R — в киловольт-амперах реактивных (квар) и P_A — в киловаттах (квт).

Для доброкачественных конденсаторов угол φ весьма близок к 90° , а $\sin \varphi$ близок к единице; поэтому

$$P_R \approx P = UI \approx U^2 \omega C, \quad (78)$$

где P_R выражено в вольтамперах реактивных (вар), если U — в в, а C — в ф.

Для силовых конденсаторов вместо емкости часто указывается реактивная мощность. В этих случаях емкость конденсатора можно вычислить по формуле

$$C = \frac{P_R}{U^2 \omega} \cdot 10^3, \quad (79)$$

где C — в мкф, P_R — в квар и U — в кв.

При включении силовых конденсаторов в цепь трехфазного тока они разбиваются на три группы, соединяемые в звезду или треугольник (рис. 24). В обоих случаях для вычисления суммарной реактивной мощности можно пользоваться одним и тем же выражением

$$P_R = 3 \cdot 10^{-3} U_C^2 \omega C, \quad (80)$$

где P_R — в квар, U_C — в кВ и C — в мкф.

В формуле (80) величина U_C представляет собой напряжение, приложенное к выводам конденсатора. При соединении треугольником U_C равно линейному напряжению сети U_L , а при соединении звездой — в $\sqrt{3}$ раз меньше. Поэтому при одном и том же значении емкости на каждую фазу суммарная реактивная мощность конденсаторной батареи при соединении в звезду будет в три раза меньше, чем при соединении в треугольник.

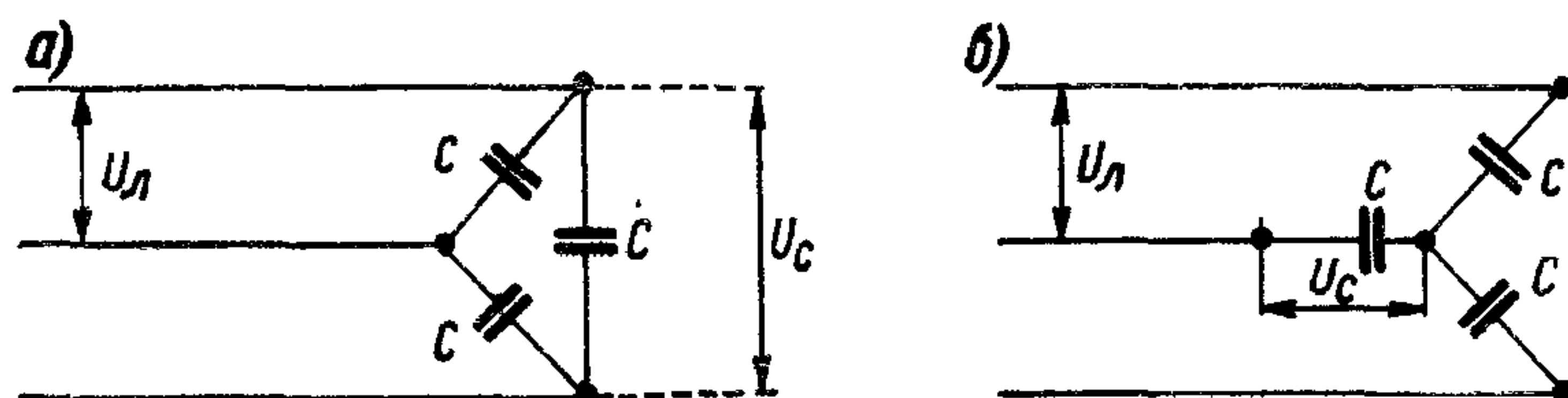


Рис. 24. Включение конденсаторной батареи в цепь трехфазного тока: а — по схеме треугольника; б — по схеме звезды.

При рабочем напряжении 550 в и ниже силовые конденсаторы, применяемые в цепях тока технической частоты (50 гц), обычно выпускают в трехфазном исполнении, с тремя выводами. В этом случае секции конденсатора, которые находятся в общем корпусе, разбиты на три группы (фазы), включенные по схеме треугольника.

Поскольку угол сдвига фаз между током и напряжением в конденсаторе близок к 90° , можно считать, что мощность конденсатора является чисто реактивной. Если считать положительной реактивную мощность индуктивных приемников, в которых ток отстает по фазе от напряжения, то реактивную мощность конденсаторов (в которых ток опережает напряжение) можно считать отрицательной.

В связи с этим, конденсаторы можно использовать для улучшения коэффициента мощности промышленных установок с индуктивной нагрузкой путем параллельного присоединения конденсаторов к отдельным индуктивным приемникам (индивидуальная компенсация) или путем включения батареи конденсаторов на шины подстанции (централизованная компенсация). Вектор тока I_C , потребляемого конденсаторами, почти на 180° опережает вектор реактивной составляющей тока индуктивного приемника (рис. 25); поэтому, подбирая соответственно емкость батареи, можно получить или полную компенсацию вектора

I_L , т. е. довести значение сдвига фаз установки (приемника) до нуля, или же уменьшить этот сдвиг от значения φ_1 до заданного значения φ_2 , резко снизив реактивную составляющую тока нагрузки. При этом соответственно уменьшается полный ток, потребляемый индуктивным приемником, что снижает потери в линии и разгружает источник энергии (генератор, трансформатор), от которого питается данный приемник. Если угол сдвига фаз приемника, потребляющего активную мощность P_A , надо уменьшить от

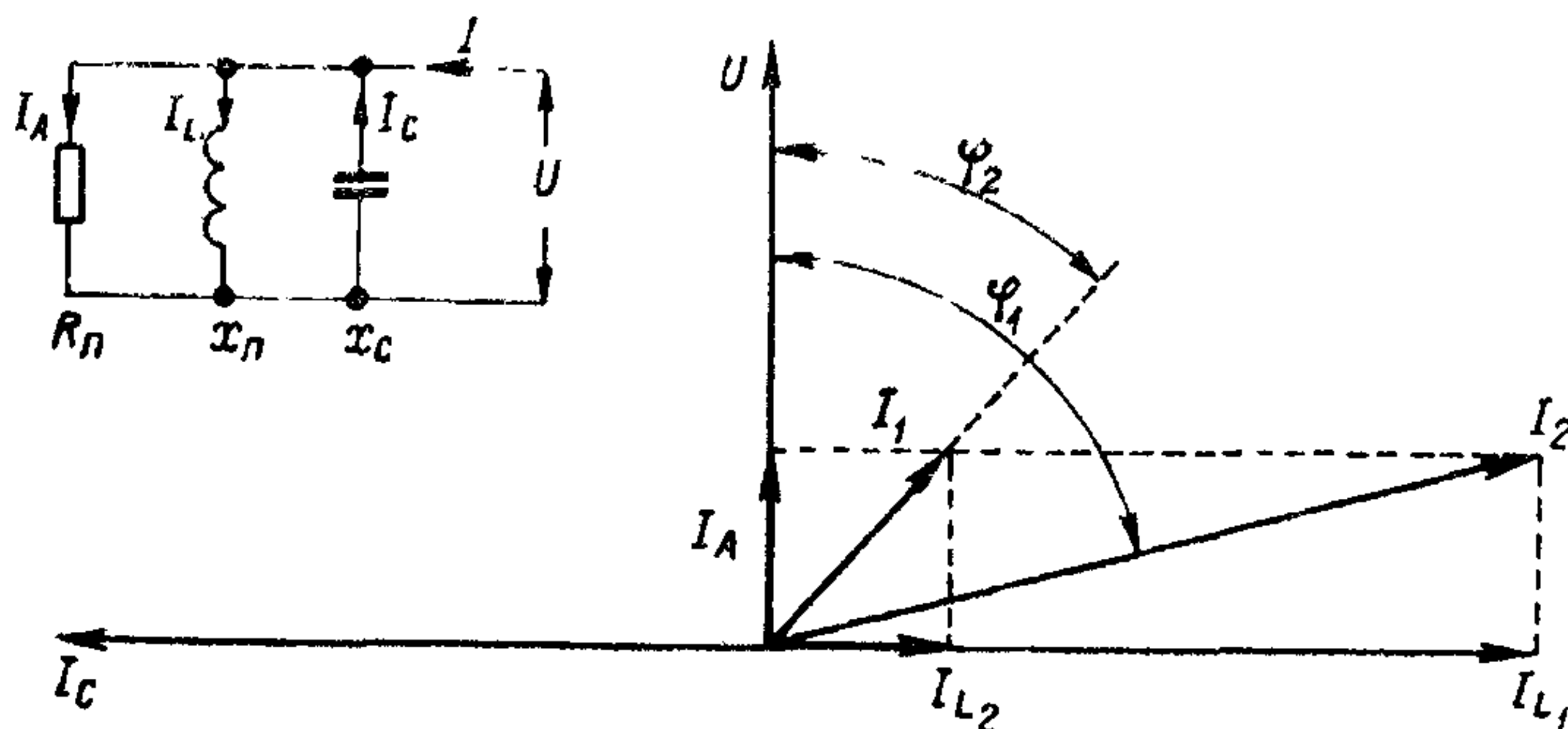


Рис. 25. Уменьшение угла сдвига фаз индуктивного приемника при параллельном включении конденсатора.

значения φ_1 до φ_2 , то необходимая для этого реактивная мощность конденсаторов может быть подсчитана по формуле

$$P_C = P_A (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2), \quad (81)$$

где P_C — в квар и P_A — в квт.

Особенно большое значение имеет применение конденсаторов для улучшения коэффициента мощности индукционных печей, обладающих очень низким значением $\cos \varphi$ (около 0,1).

П о с л е д о в а т е л ь н о е в к л ю ч е н и е к о н д е н с а т о р о в используется для компенсации реактивного падения напряжения в линии передачи электрической энергии, повышения устойчивости работы станций, подключенных к этой линии, повышения пропускной способности линии, а также для уменьшения влияния толчков тока на стабильность напряжения в распределительных линиях при включении мощных приемников (асинхронных электродвигателей, электросварочных аппаратов и т. п.). Регулирующее действие последовательно включенных конденсаторов, пропорциональное току в линии, происходит мгновенно и практически не требует увеличения активной мощности, поскольку потери в конденсаторах малы.

Принципиальная схема последовательного включения конденсатора и изменение векторной диаграммы после включения конденсатора показаны на рис. 26. Здесь $U_{\text{ген}}$ — напряжение на выводах источника энергии; $U_{\text{п}}$ — напряжение на выводах приемника; I — ток в линии; $r_{\text{л}}$, $x_{\text{л}}$ и $z_{\text{л}}$ — активное, реактивное и полное

сопротивления линии (после включения конденсатора линия разбивается на два участка: 1 и 2); x_C — реактивное сопротивление конденсатора; r_n и x_n — активное и реактивное сопротивления приемника энергии. На рис. 26 показано, что включение конденсатора приводит к уменьшению вектора $U_{ген}$ (при заданной величине вектора U_n), к уменьшению угла сдвига фаз между вектором $U_{ген}$ и вектором тока в линии I и к уменьшению угла сдвига фаз между векторами $U_{ген}$ и U_n . Для определения мощности батареи, необходимой для емкостной компенсации при последовательном включении конденсаторов в линию, на основе экономических и технических расчетов выбирают определенную степень компенсации, т. е.

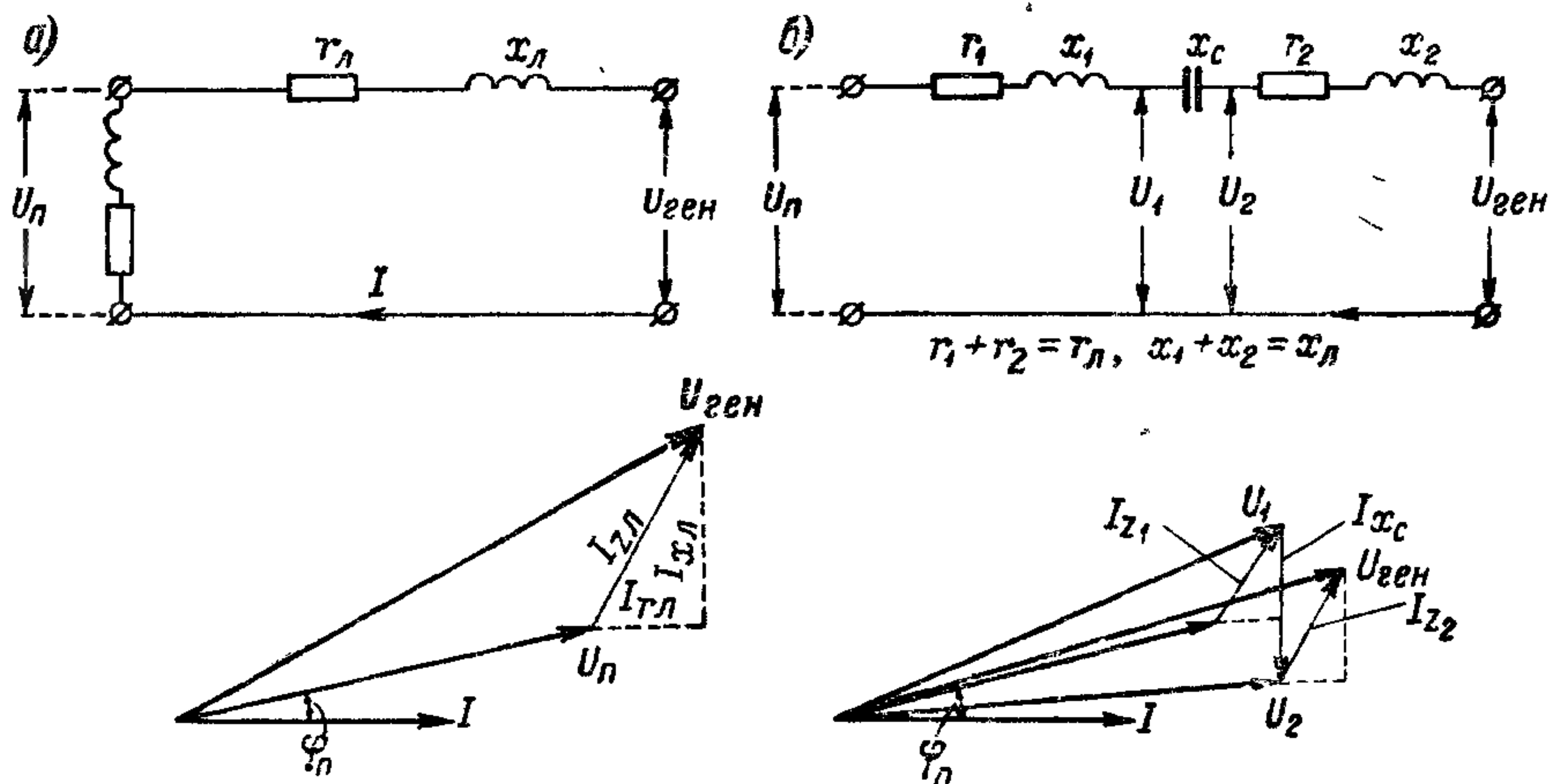


Рис. 26. Последовательное включение конденсатора в линию передачи:
а — линия без конденсатора; б — линия с конденсатором.

отношение реактивного сопротивления конденсаторов к реактивному (индуктивному) сопротивлению линии:

$$k_n = \frac{x_C}{x_L}. \quad (82)$$

Зная x_L и выбрав k_n , можно вычислить x_C и найти по формуле (67) емкость на одну фазу C_ϕ . Номинальное рабочее напряжение конденсаторов U_C можно найти, зная x_C или C_ϕ , а максимальное значение тока нагрузки линии I — используя формулу (68). Далее необходимая мощность батареи конденсаторов подсчитывается по формуле (80).

Номинальное рабочее напряжение последовательно включенной батареи значительно меньше напряжения линии, а потому возникает опасность пробоя конденсатора, если вследствие короткого замыкания на линии напряжение на выводах батареи возрастет до значения напряжения линии или близкого к нему. Поэтому последовательно включаемые конденсаторы снабжаются защитными устройствами, представляющими собой сочета-

ние разрядника и шунтирующего выключателя, замыкающего конденсаторы «накоротко» в момент повышения напряжения на выводах батареи до опасного значения. Обычно в качестве опасного значения для силовых конденсаторов принимается напряжение, превышающее трехкратное номинальное рабочее напряжение.

В СССР успешно работает уникальная по мощности батарея емкостной последовательной компенсации на линии передачи Куйбышев — Москва с напряжением 500 кВ. Суммарная мощность этой батареи, состоящей из 10 000 конденсаторов, составляет около 500 000 квар.

Строительство новых сверхдальних мощных линий передачи энергии новых электростанций Сибири в Европейскую часть СССР потребует строительства еще более мощных конденсаторных батарей.

В цепях переменного тока конденсаторы находят себе применение также в схемах конденсаторных электродвигателей (электрический транспорт, электробытовая аппаратура). В таких электродвигателях для создания вращающегося магнитного поля при питании однофазным током в статоре укладываются две обмотки с геометрическим сдвигом на 90° ; для получения угла сдвига фаз во времени между токами в этих двух обмотках, близкого к 90° , последовательно с одной из обмоток включается конденсатор C_1 ; для увеличения вращающего момента при пуске двигателя используется второй конденсатор C_2 — пусковой, присоединяемый параллельно C_1 только на время пуска с помощью центробежного выключателя B , который автоматически отсоединяет C_2 , когда ротор двигателя достигает нормального числа оборотов (рис. 27).

Рис. 27. Схема конденсаторного электродвигателя: C_1 — основной конденсатор; C_2 — пусковой конденсатор; B — центробежный выключатель.

Конденсатор C_2 рассчитывается лишь на кратковременную периодическую работу при переменном токе (в случае электробытовых приборов продолжительность каждого включения обычно принимают равной 3 сек при частоте включений до 20 в час); конденсатор C_1 должен быть рассчитан на нормальную длительную работу.

При включении конденсатора в цепь переменного тока надо иметь в виду, что даже при отсутствии индуктивности переходный процесс протекает значительно сложнее, чем при постоянном токе. Изменения напряжения на выводах конденсатора и изменения тока в этом случае обусловлены наложением друг на друга двух процессов: неустановившегося (проходящего) режима, исчезающего через известное время после включения конденсатора в цепь, и установившегося режима (рис. 28), соответствующего нормальной работе. Наибольшее зна-

чение тока в зависимости от момента включения t_0 может достигать величины

$$I = \frac{U}{r},$$

где U — действующее значение напряжения в сети в в и r — активное сопротивление цепи в ом .

Наибольшее значение напряжения на выводах конденсатора при наличии в цепи индуктивности может достигать двойного амплитудного значения напряжения сети. Так, при действующем значении напряжения сети, равном 220 в , наибольшее значение напряжения на конденсаторе при его включении может достигать величины $2U_{\text{макс}} = 2\sqrt{2} \cdot 220 = 620 \text{ в}$. Это обстоятельство надо

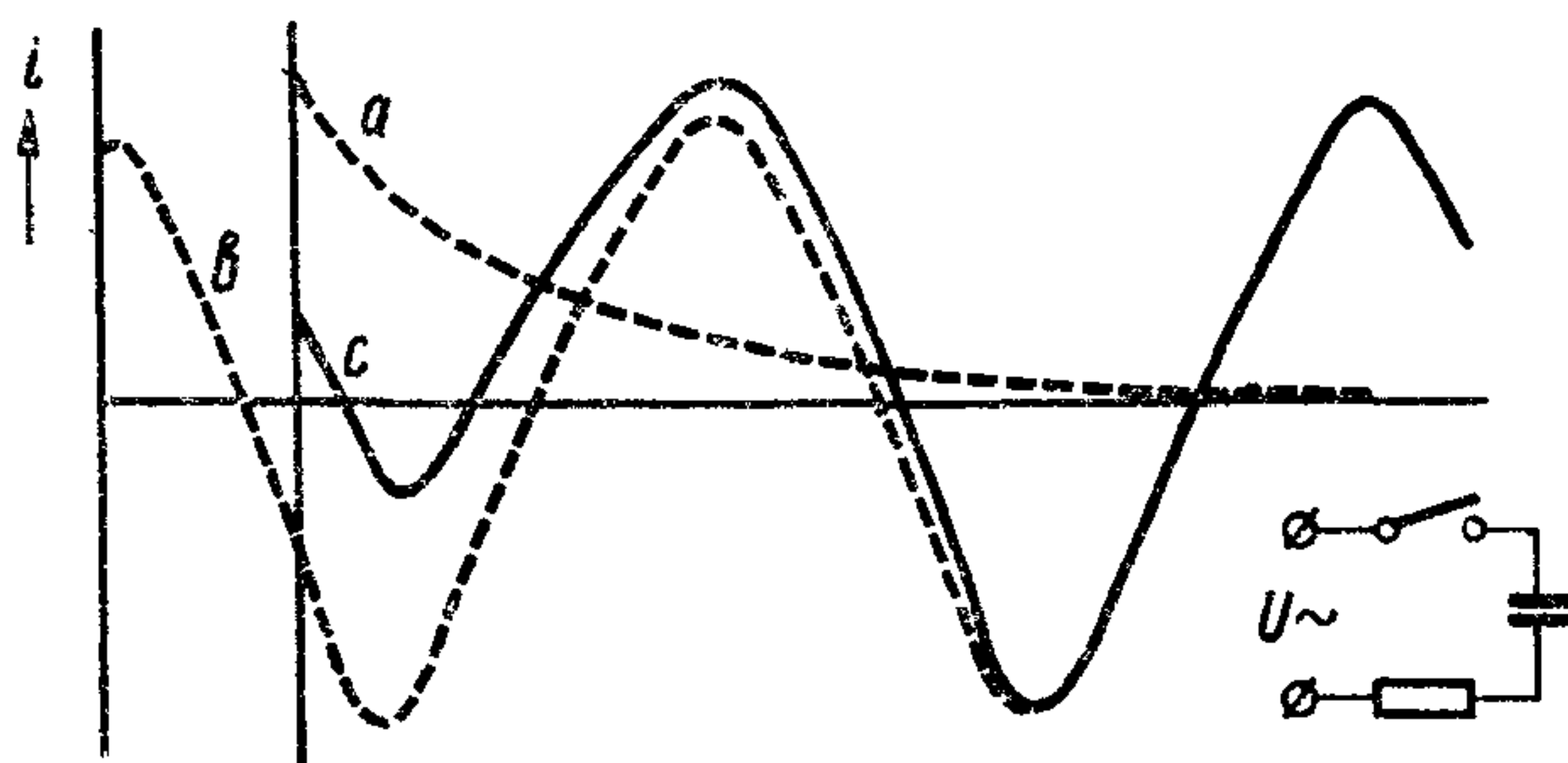


Рис. 28. Кривая тока при включении конденсатора в цепь переменного тока, не имеющую индуктивности: a — неустановившийся режим; b — установившийся режим; c — результирующая кривая тока.

учитывать при выборе конденсатора для применения в цепи переменного тока.

При наличии в цепи большой емкости, например при параллельном включении двух конденсаторных батарей, возникают колебания двух повышенных частот f_1 и f_2 , которые могут достигать значения порядка нескольких тысяч и нескольких десятков тысяч герц. Максимальные перенапряжения наступают примерно через полупериод колебаний и равны приблизительно $2U_{\text{ном}}$ на включаемой батарее и $U_{\text{ном}}(1 + 2C_2/C_1 + C_2)$ на работающей батарее, где C_1 — емкость работающей, а C_2 — емкость подключаемой батареи. Наибольшие толчки тока определяются колебаниями более высокой частоты f_2 . В обычной практике толчки тока не превышают 20 ка и уже через один полупериод технической частоты высокочастотный ток спадает практически до нуля. При подключении к работающей батарее мощностью 3000 квар второй батареи мощностью 2000 квар было установлено, что $f_1 = 3100 \text{ гц}$ и $f_2 = 25 \div 30 \text{ кгц}$; перенапряжение на включаемой батарее составило $1,35 U_{\text{ном}}$, а толчки тока оказались равными при частоте f_1 300 а , а при частоте f_2 — 800 а . Такие значения перенапряжений и толчков тока не представляют особой опасности.

§ 19. Зависимость емкости конденсатора от частоты и от величины приложенного напряжения

Применяя конденсатор в цепи переменного тока, особенно при повышенных или высоких частотах, необходимо иметь в виду, что емкость его может заметно изменяться при повышении частоты, обычно в сторону снижения. Уменьшение емкости с ростом частоты может прежде всего объясняться соответствующим с н и ж е н и е м диэлектрической проницаемости диэлектрика (§ 8), обусловленным ослаблением релаксационных видов поляризации при повышенных частотах.

При наличии междуслойной поляризации замечается снижение емкости конденсатора, вызванное соответствующим уменьшением ϵ , наблюдается в области низких частот (рис. 29) при переходе от постоянного тока к технической и звуковой частоте. Дипольная и дипольно-радикальная релаксационная поляризация могут вызывать снижение ϵ и соответствующее снижение емкости в области радиочастот. На верхнем пределе радиочастот может быть снижение емкости и за счет других видов релаксационной поляризации, а также за счет ослабления спонтанной поляризации.

Если же в диэлектрике имеют место только деформационные виды поляризации: электронная и ионная, то ϵ в широком диапа-

зоне частот не должна зависеть от частоты, а следовательно, не будет иметь места и снижение емкости, обусловленное изменением ϵ . Однако и в этом случае изменение емкости с частотой может наблюдаться за счет влияния конструктивных элементов конденсатора: его индуктивности и сопротивления обкладок и выводов.

Практически о величине емкости конденсатора (действующей емкости) мы судим по величине тока, потребляемого конденсатором. Наличие индуктивности L в конденсаторе дает увеличение его действующей емкости с ростом частоты (рис. 30), так как ток будет возрастать за счет компенсации реактивного емкостного сопротивления индуктивным сопротивлением. Приравняем значения полных сопротивлений: конденсатора с индуктивностью L и емкостью C и эквивалентного ему конденсатора с действующей

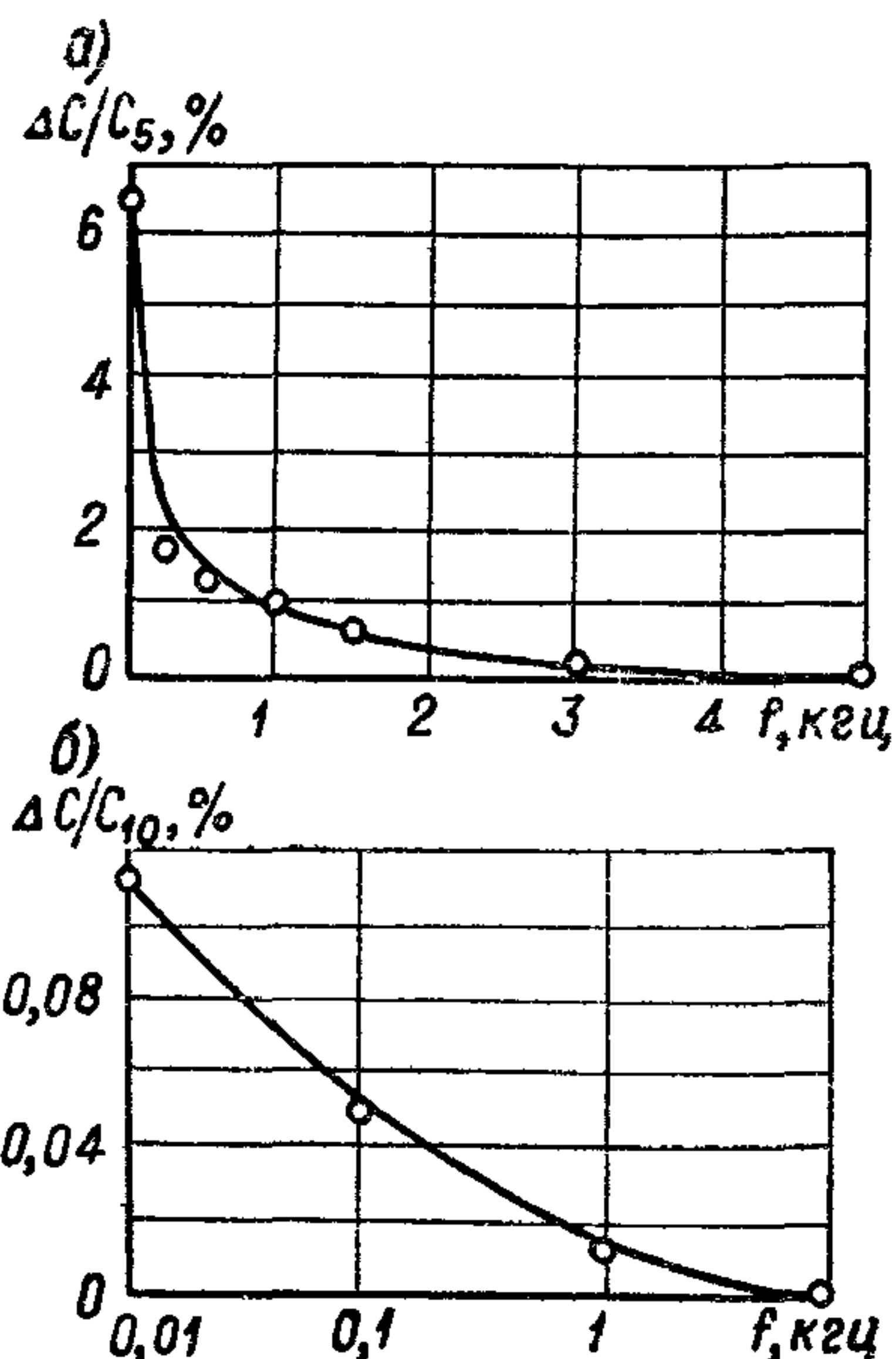


Рис. 29. Зависимость емкости бумажного (а) и слюдяного (б) конденсаторов от частоты (междуслойная поляризация).

емкостью C_d , без индуктивности. Пренебрегая наличием активного сопротивления, можем написать:

$$z \approx \frac{1}{\omega C} - \omega L; \quad z_d \approx \frac{1}{\omega C_d}; \quad \frac{1}{\omega C_d} = \frac{1}{\omega C} - \omega L,$$

откуда

$$\omega C_d = \frac{1}{\frac{1}{\omega C} - \omega L} = \frac{\omega C}{1 - \omega^2 LC}; \quad C_d = \frac{C}{1 - \omega^2 LC}. \quad (83)$$

Выражение (83) показывает, что зависимость действующей емкости от частоты усиливается как при увеличении индуктивности L ,

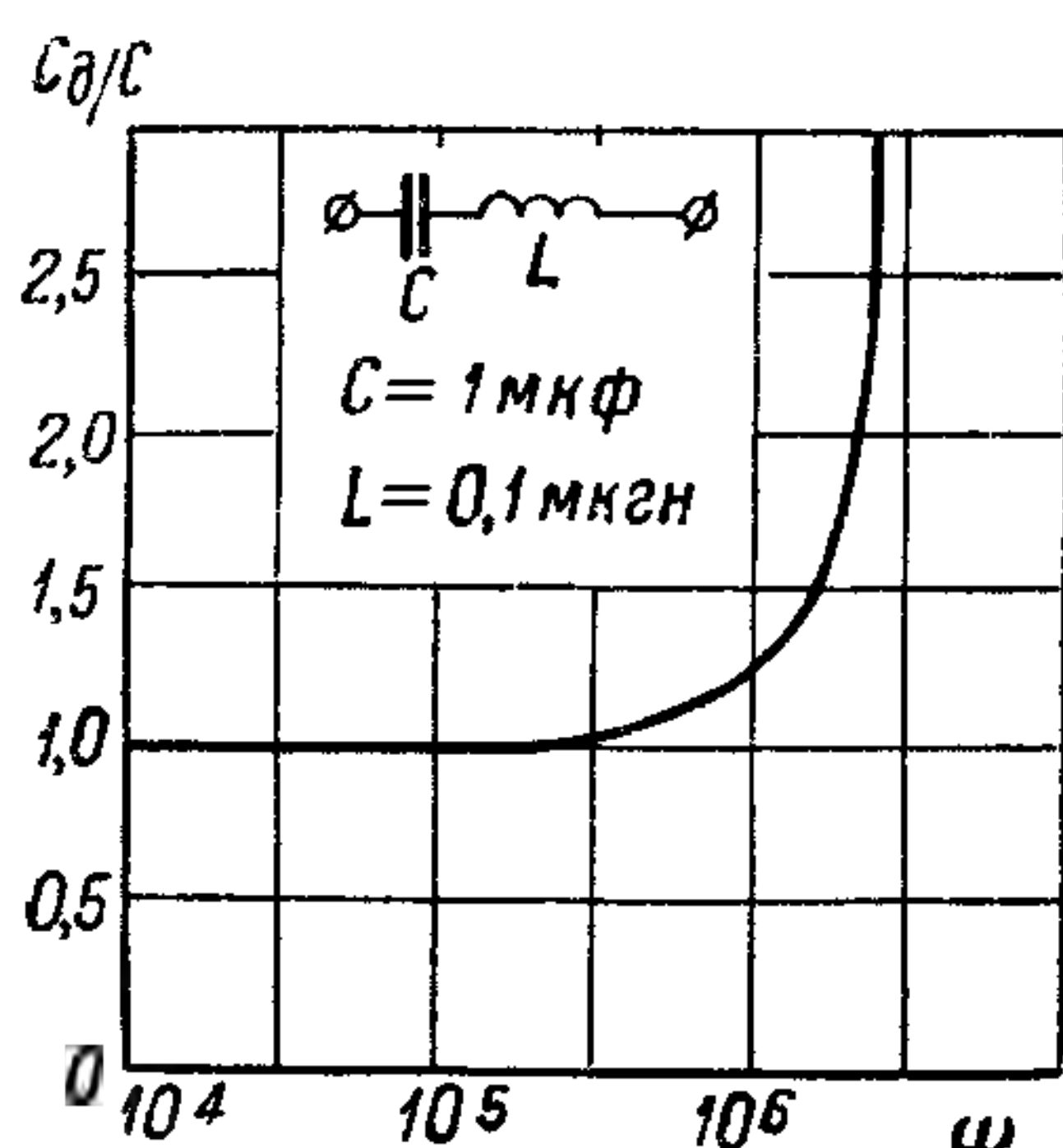


Рис. 30. Влияние индуктивности конденсатора на зависимость его емкости от частоты.

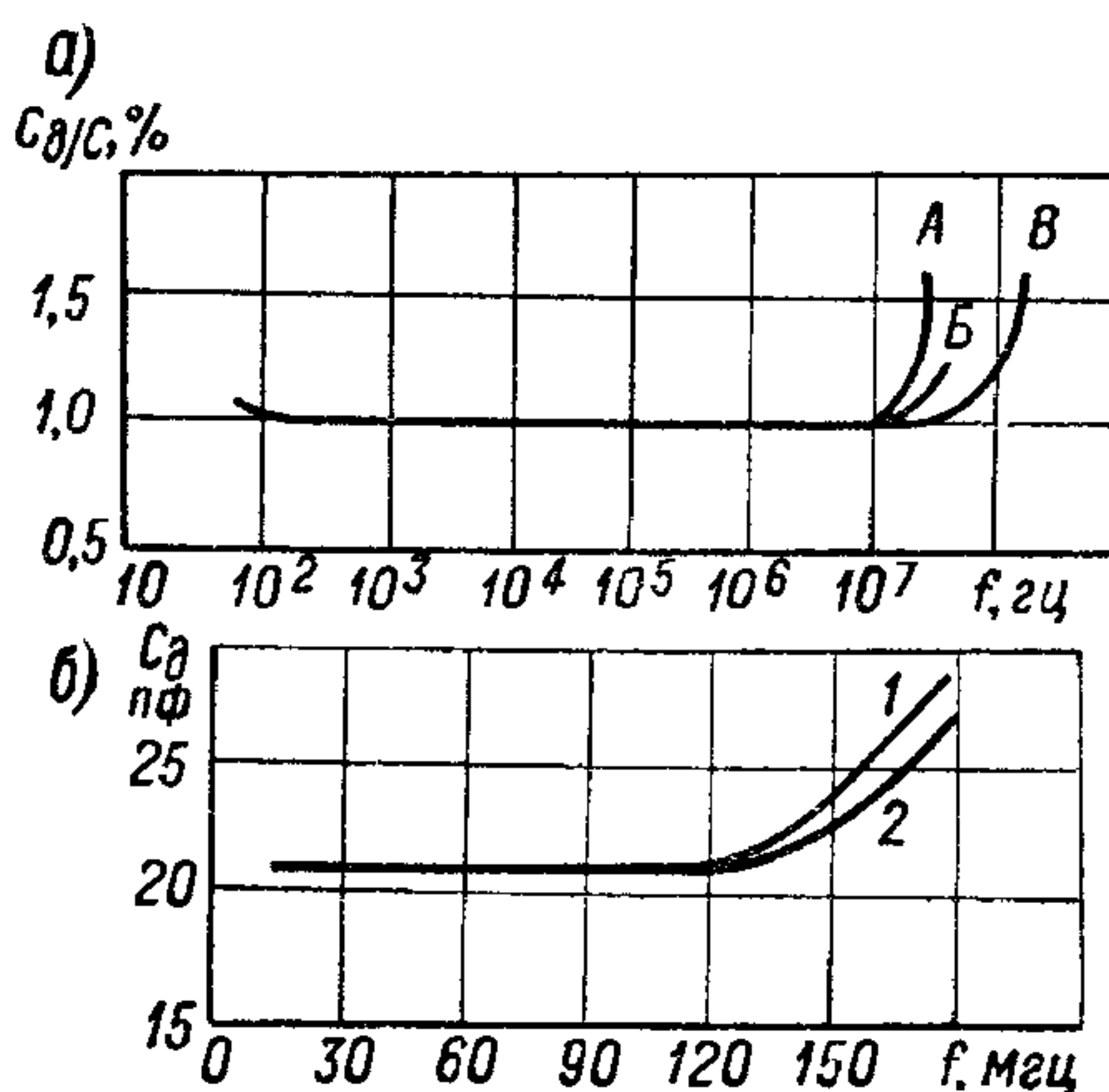


Рис. 31. Влияние частоты на емкость керамических конденсаторов. Вверху: А — 100 пф; Б — 36 пф; В — 12 пф (длина выводов 10—12 мм); внизу: 1 — длина вывода 5 мм; 2 — длина вывода 1,5 мм.

так и при увеличении емкости C при заданном значении L (рис. 31, а). Следует иметь в виду, что при высоких частотах, кроме наличия индуктивности самого конденсатора, на частотную зависимость емкости может влиять и индуктивность выводных проводников конденсатора (§ 17), которые в этом случае следует брать возможно более короткими (рис. 31, б).

Н а л и ч и е а к т и в н о г о с о п р о т и в л е н и я r , включенного последовательно с емкостью конденсатора (например, сопротивления обкладок), должно ограничивать ток, протекающий через конденсатор, причем этот эффект должен быть тем заметнее, чем выше частота, так как с ростом частоты падает емкостное реактивное сопротивление и влияние активного сопротивления на величину тока возрастает. Величину действующей емкости C_d , которой мы можем заменить систему из истинной емкости C и последовательного

сопротивления r , можно вычислить по формуле (84), вывод которой будет дан ниже (§ 26):

$$C_d = \frac{C}{1 + \omega^2 C^2 r^2}. \quad (84)$$

Характер зависимости действующей емкости от частоты, обусловленной наличием последовательно включенного сопротивления, показан на рис. 32. Формула (84) показывает, что увеличение емкости конденсатора C при заданном значении r усиливает частотную зависимость. В обычных конденсаторах сопротивление обкладок и выводов, определяющее величину r , достаточно мало,

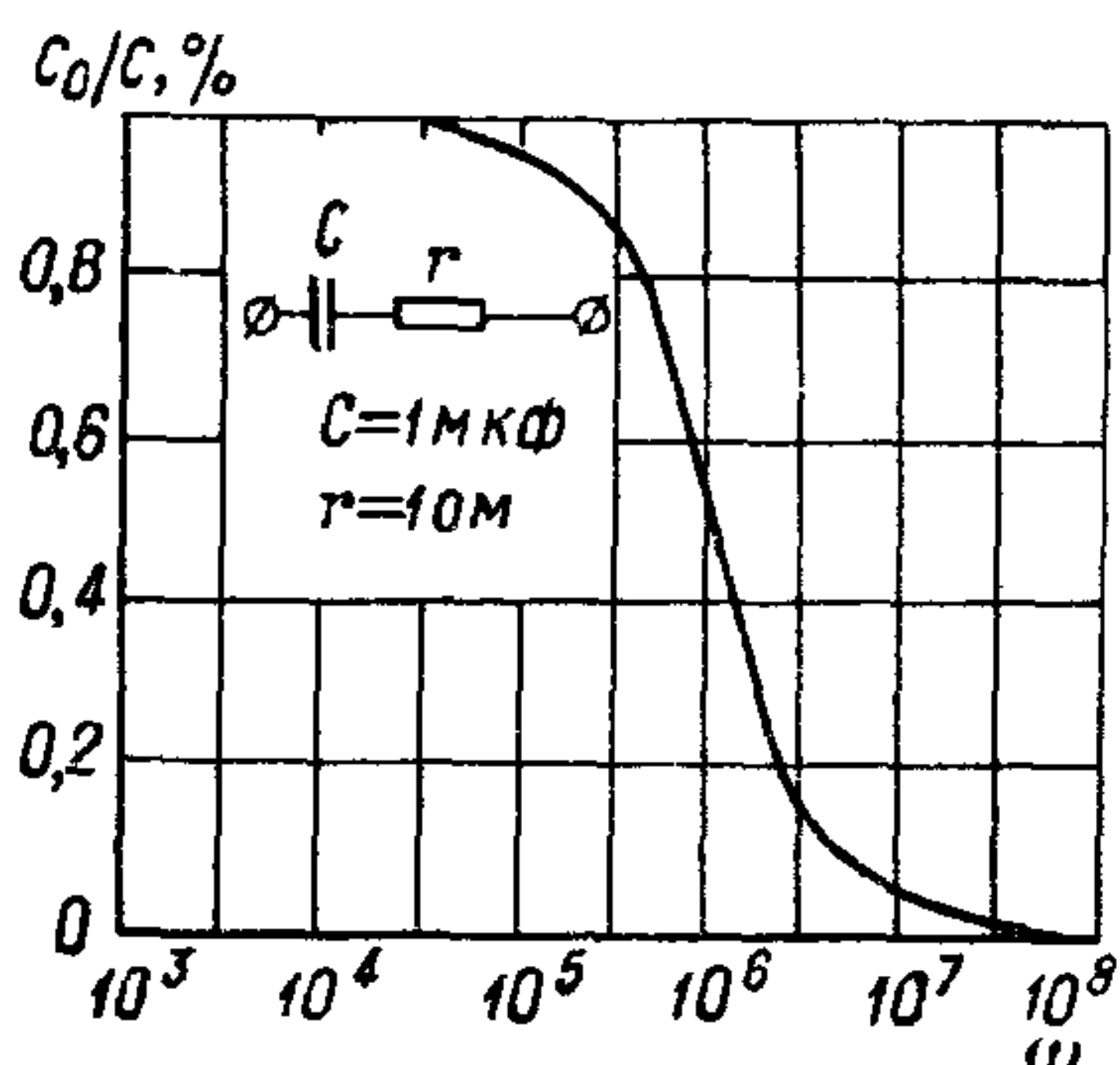


Рис. 32. Влияние последовательно включенного активного сопротивления на зависимость емкости от частоты.

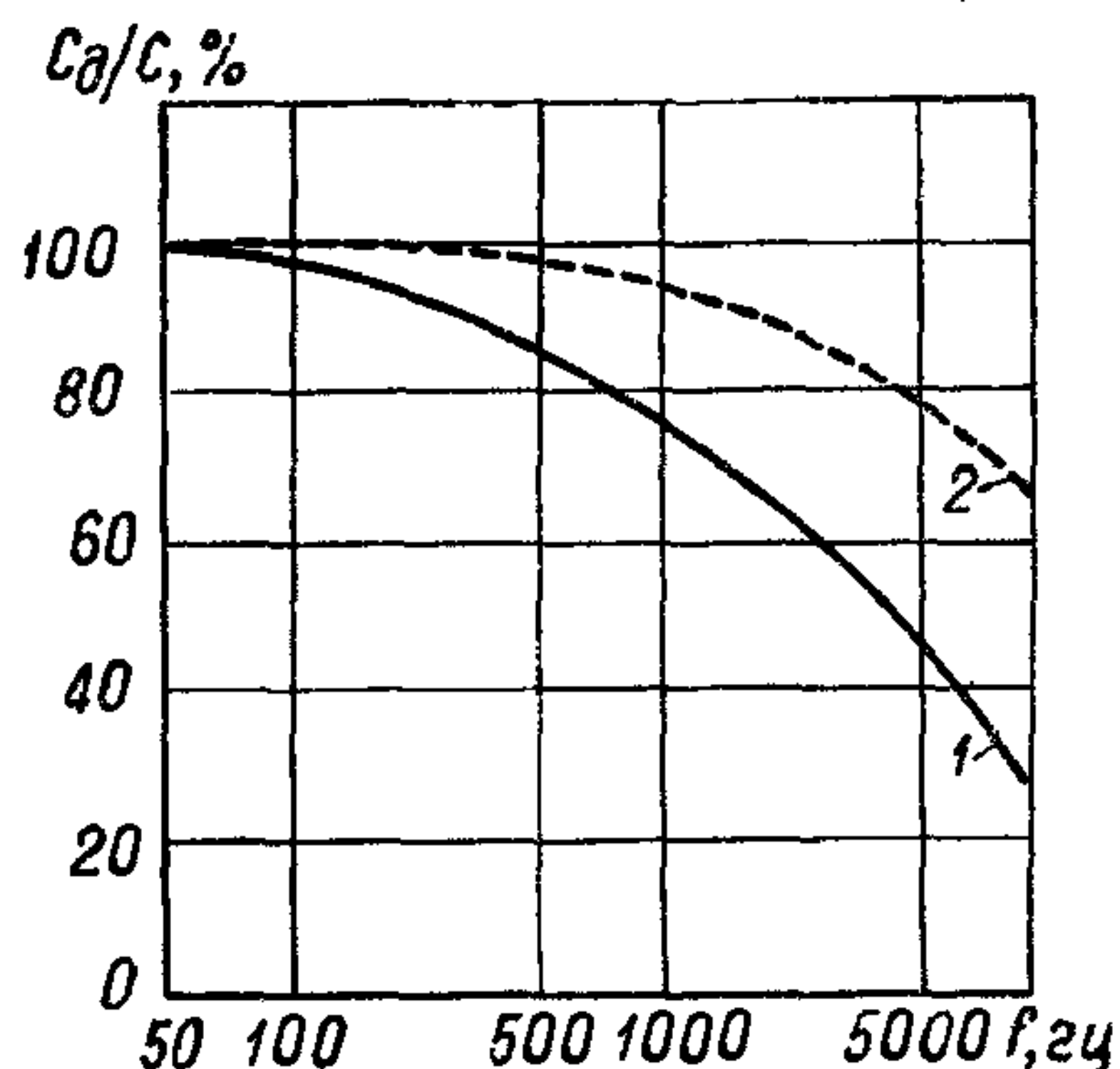


Рис. 33. Зависимость емкости электролитических конденсаторов от частоты.

1 — обычный конденсатор; 2 — оксидно-полупроводниковый конденсатор.

порядка долей ома, а потому снижение емкости с частотой можно заметить лишь в области радиочастот, даже при относительно больших номинальных емкостях. У электролитических конденсаторов роль одной из обкладок играет слой электролита с удельным сопротивлением порядка сотен и даже тысяч $\text{ом} \cdot \text{см}$, тогда как у металлических обкладок эта величина исчисляется в $\text{мком} \cdot \text{см}$. Кроме того, эти конденсаторы изготовляют с большими значениями емкости. Поэтому для таких конденсаторов снижение емкости с частотой наблюдается уже в области звуковых частот (10^2 — 10^4 Гц) (рис. 33). В новом типе оксидно-полупроводниковых электролитических конденсаторов электролит заменен твердым полупроводником, имеющим более низкое удельное сопротивление, что дает заметное ослабление частотной зависимости емкости.

Необходимо иметь в виду, что выражения (83) и (84), которыми мы охарактеризовали частотную зависимость емкости, являются приближенными не только потому, что (83) не учитывает наличие активного сопротивления, а (84) — наличия индуктивности, но также и потому, что при выводе этих двух выражений и актив-

ное сопротивление, и индуктивность рассматривались как сосредоточенные величины, тогда как на самом деле в большинстве случаев они являются распределенными величинами. Тем не менее эти выражения правильно характеризуют качественный характер частотной зависимости емкости.

Следует подчеркнуть, что как частотная зависимость ϵ , так и влияние последовательного активного сопротивления вызывают снижение емкости конденсатора с частотой; рост действующего значения емкости с частотой может быть обусловлен только влиянием индуктивности или самого конденсатора, или проводников, которыми он включен в схему.

Как для неполярных, так и для полярных диэлектриков величина диэлектрической проницаемости не зависит от напряженности поля, а потому для большинства типов конденсаторов емкость не должна зависеть от величины приложенного напряжения. Небольшое возрастание емкости при повышении напряжения выше $U_{\text{ион}}$ — напряжения начала ионизации (§ 35) может наблюдаться для конденсаторов, диэлектрик которых содержит значительное число остаточных воздушных включений. Емкость, обусловленная остаточным воздухом, включается последовательно с емкостью основного диэлектрика и дает некоторое снижение емкости конденсатора. При возникновении ионизации в воздушных включениях они делаются проводящими, емкость этих включений закорачивается, и общая емкость конденсатора — возрастает. Обычно это возрастание не превышает нескольких процентов. В процессе измерения угла потерь высоковольтных конденсаторов при высоких значениях напряжения время, в течение которого производится измерение, может оказаться достаточным для того, чтобы в конденсаторе выделилось заметное количество тепла (потери в конденсаторе пропорциональны второй степени напряжения — см. § 26), и температура его повысилась. В этом случае может наблюдаться изменение емкости, вызванное изменением температуры конденсатора. Такое же явление может наблюдаться и при длительной работе конденсатора при повышенном (и даже номинальном) переменном напряжении.

В сегнетокерамических конденсаторах диэлектрик обладает спонтанной поляризацией (§ 8), для которой характерна резкая зависимость ϵ от напряжения. Для таких конденсаторов емкость должна сильно зависеть от напряжения. При изготовлении специальных нелинейных конденсаторов («варикондов») с емкостью, управляемой величиной приложенного напряжения (см. ниже, § 99), подбором состава керамики стремятся усилить зависимость $\epsilon = f(E)$. У таких конденсаторов при изменении напряжения емкость может измениться несколько раз.

При использовании сегнетокерамики для изготовления обычных конденсаторов большой емкости с диэлектриком, обладающим высокой ϵ , подбором состава керамики стремятся максимально

ослабить зависимость $\epsilon = f(E)$. У таких конденсаторов изменение напряжения от нуля до номинального значения (повышение E до 1 кВ/мм) при величине диэлектрической проницаемости диэлектрика 1000—8000 приводит к изменению емкости на $\pm 10 \div 30\%$. Здесь имеется в виду переменное напряжение. При наложении постоянного напряжения емкость конденсаторов из сегнетокерамики, измеренная при небольших значениях переменного напряжения, несколько снижается.

Зависимость емкости от напряжения может также наблюдаться в конденсаторах из восстановленной керамики (§ 70), а также в полупроводниковых конденсаторах (§ 100), в которых используется емкость $p-n$ -перехода. Этот тип конденсатора, так же как «вариконды», используется для получения переменной емкости, управляемой напряжением, и будет рассмотрен подробнее в гл. XV.

Глава IV

ОБКЛАДКИ КОНДЕНСАТОРА

§ 20. Общие соображения

Если при постоянном напряжении обкладки конденсатора практически не нагружены током и по существу служат лишь для создания электрического поля в диэлектрике (если не считать моменты зарядки или разряда конденсатора), то при переменном напряжении они должны нести значительный ток, определяемый выражением (68); в этом случае приходится уделять внимание расчету толщины обкладки и величине удельного сопротивления металла, из которого она изготовлена. При тепловых расчетах конденсаторов переменного напряжения приходится учитывать также теплоемкость и теплопроводность металла обкладок; плотность металла играет роль при подсчете веса конденсатора; представляют интерес и такие характеристики металла, как коэффициент линейного расширения (при подсчете ТКЕ) и температура плавления (при оценке нагревостойкости). При изготовлении обкладок из металлической фольги в производстве конденсаторов намотанного типа представляет интерес и механическая прочность металла, так как тонкая фольга должна выдержать без обрыва натяжение, прикладываемое к ней на намоточном станке.

Большое значение имеет правильный расчет обкладок и для импульсных накопительных конденсаторов, при разряде которых по обкладкам кратковременно протекают очень большие токи, достигающие значений порядка килоампер и выше.

Современное конденсаторостроение применяет для изготовления обкладок различных типов конденсаторов большое число различных металлов. Некоторые характеристики этих металлов приведены в табл. 1.

Некоторые свойства материалов, применяемых в конденсаторостроении для изготовления обкладок

Название материала	Удельное сопротивление, $\text{мком} \cdot \text{см}$	Температурный коэффициент сопротивления, $\text{град}^{-1} \cdot 10^4$	Плотность, г/см^3	Коэффициент линейного расширения, $\text{град}^{-1} \cdot 10^6$	Температура плавления, град	Теплоемкость (0—100° C) $\text{ккал/град} \cdot \text{ч}$	Теплопроводность, $\text{вт/см} \cdot \text{град}$
Серебро	1,62	36	10,5	19,7	960	0,056	4,20
Медь	1,75	44	8,9	16,5	1083	0,100	3,93
Золото	2,4	38	19,3	14,2	1063	0,062	—
Алюминий	2,8	42	2,7	23,8	658	0,168	2,22
Бронза	5,2	15	8,8	17	900	0,087	2,00
Вольфрам	5,5	46	19,3	4,4	3380	0,033	1,60
Молибден	5,7	46	10,2	5,1	2620	0,063	1,44
Цинк	6,0	39	7,1	17,1	419	0,100	1,10
Латунь	6,5	10	8,6	18,7	900	0,092	1,30
Платина	10,5	39	21,4	9,0	1770	0,032	0,68
Палладий	10,8	35	11,5	11,8	1555	0,062	—
Никель	11,3	60	8,8	13,0	1452	0,108	0,75
Олово	13,4	44	7,4	26,7	232	0,559	0,63
Ниобий	14,0	—	8,5	—	2450	—	—
Тантал	14,6	35	16,6	6,5	2980	0,036	0,54
Свинец	20,5	41	11,3	28,5	327	0,031	0,34
Титан	54	—	4,5	—	1700	—	—

Кроме металлических обкладок, в ряде типов конденсаторов применяются также обкладки в виде слоя жидкого или вязкого электролита или в виде слоя полупроводника.

В случае конденсаторов с газообразным или жидким диэлектриком, которые не могут служить конструктивной опорой для обкладок, приходится использовать относительно массивные обкладки с толщиной порядка 0,25—0,5 мм и выше из алюминия, меди или их сплавов.

В случае конденсаторов с твердым диэлектриком последний может быть использован в качестве механической опоры для обкладок; поэтому их толщина может быть резко снижена. При изготовлении таких конденсаторов в качестве обкладок применяются: тонкая металлическая фольга, порядка 5—6 мкм или выше (алюминиевая, свинцово-оловянная, медная), или весьма тонкие слои металла, непосредственно нанесенные на поверхности диэлектрика тем или иным способом металлизации (цинк, алюминий, серебро и др.). Толщина этих слоев в зависимости от типа конденсатора и метода металлизации может составлять от нескольких микрон до 0,01—0,1 мкм.

При изготовлении электролитических конденсаторов в качестве одной из обкладок применяется фольга из того или иного

вентильного металла, способного образовывать оксидные диэлектрические слои при электролитическом окислении (алюминий, тантал, ниобий, титан). Толщина такой фольги, в зависимости от типа конденсатора и от типа металла, обычно лежит в пределах 10—100 *мкм*. Наряду с фольгой вентильные металлы применяются также в виде проволоки и в виде пористых таблеток, спеченных из порошка такого металла.

Тугоплавкие благородные металлы: золото, платину, а также палладий применяют в виде тонких слоев в конструкции конденсаторов, при изготовлении которых предусматривается воздействие высокой температуры, способной вызвать окисление или расплавление обкладок. Тугоплавкие, но окисляющиеся металлы: вольфрам, молибден, никель представляют интерес для замены благородных металлов в тех случаях, где технологический нагрев может производиться в условиях восстановительной среды, исключающей опасность окисления металла обкладок.

§ 21. Обкладки из фольги

Обкладки из тонкой металлической фольги широко применяются в производстве конденсаторов намотанного типа с органическим диэлектриком (бумажным, пленочным), а также в производстве некоторых типов слюдяных и стеклопленочных конденсаторов.

Основным типом металлической фольги, применяемой в конденсаторостроении, является а л ю м и н и е в а я ф о л ь г а. Алюминий обладает небольшим удельным сопротивлением, высокой теплопроводностью, легко прокатывается до малых толщин и относительно дешев. Недостатком алюминия являлась трудность пайки, но теперь разработаны специальные припой, позволяющие успешно преодолевать эту трудность.

В производстве бумажных и пленочных конденсаторов применяется алюминиевая фольга с содержанием алюминия 99,5—99,7% (ГОСТ — 618-62) толщиной 7—8 *мкм*. Временное сопротивление разрыву для этой фольги должно быть не менее 7,5 $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$ при удлинении не менее 0,5%; такая фольга называется жесткой. Для мягкой отожженной фольги удлинение — до 2%, но прочность на разрыв понижена. В производстве силовых конденсаторов иногда применяют фольгу толщиной порядка 10 *мкм* и даже до 16 *мкм* при повышенной частоте. За рубежом применяют также фольгу толщиной 5—6 *мкм*; у нас такая фольга используется в производстве некоторых типов малогабаритных конденсаторов.

В производстве электролитических конденсаторов (гл. XIII) применяют для изготовления анодов алюминиевую фольгу с содержанием алюминия 99,95 и 99,99% толщиной 50—100 *мкм*.

Некоторые зарубежные фирмы вместо тонкой алюминиевой фольги применяют иногда также о л о в я н н у ю (точнее оловянно-свинцовую с добавкой сурьмы) как материал легко поддающийся пайке и, благодаря своей мягкости, плотнее прилегающий к

диэлектрику. У нас такая фольга изготавливается небольшими партиями с толщиной до 7 мм. Состав фольги: 84—85% Sn, 13—14% Pb, 1—2% Sb; прочность на разрыв — 5,5—6,5 кг/мм², удельное сопротивление — не выше 25 мком · см. Недостатком этой фольги, кроме повышенной стоимости и увеличенного удельного сопротивления, является худшая теплопроводность и повышенный удельный вес. Более толстая фольга такого же типа, имеющая временное сопротивление разрыву не менее 3 кг/мм², с толщиной от 7—10 до 40—50 мм применяется в производстве слюдяных конденсаторов.

Красномедная фольга, содержащая не менее 99,7% меди, применяется в производстве намотанных конденсаторов небольшой емкости, когда требуется увеличенная прочность обкладок (например, при намотке конденсаторов с применением заранее нарезанных обкладок небольшой длины). Толщина этой фольги обычно лежит в пределах от 15 до 50 мм. Такую фольгу иногда применяют также в производстве слюдяных конденсаторов, когда требуется использовать обкладки с пониженным удельным сопротивлением. В этом случае поверхность фольги иногда покрывают оловом или серебром с помощью электролиза.

При использовании этой фольги в виду ее большой жесткости по сравнению с оловянно-свинцовой для обеспечения достаточного прилегания обкладок к слюде надо увеличивать степень сжатия конденсаторных секций. Наличие заусенцев на краях красномедной фольги опасно, так как может приводить к проколам диэлектрика и снижению электрической прочности конденсатора. Для устранения этой опасности ленты фольги часто пропускают между вальцами, разглаживающими заусенцы. Луженая красномедная фольга применяется также для изготовления вкладных контактов в намотанных конденсаторах с обкладками из алюминиевой или оловянно-свинцовой фольги при намотке со скрытой фольгой (рис. 20, а).

Латунная и бронзовая фольга, отличающиеся повышенной упругостью, находят себе ограниченное применение при изготовлении воздушно-слюдяных подстроечных конденсаторов (гл. XIV), специальных подгоночных обкладок в слюдяных конденсаторах (рис. 5, б) и т. п.

Тонкая танталовая фольга толщиной 10—15 мм, применяемая в производстве электролитических конденсаторов, так же как и алюминиевая фольга является носителем оксидного слоя (диэлектрика).

При выборе материала для обкладок, кроме оценки его электропроводности и механических свойств, надо учитывать также его влияние на процессы старения пропитывающих составов, применяемых в конденсаторном производстве. Относительно большая поверхность обкладок в намотанных конденсаторах в сравнении с относительно небольшим объемом диэлектрика, прилегающего к обкладке (при малых толщинах диэлектрика,

применяемых конденсаторостроением), дает резкое усиление каталитического действия металла обкладки на химические или электрохимические явления, протекающие в процессе старения. В частности, алюминий при постоянном напряжении и повышенной температуре вызывает быстрое разложение хлорированных полярных пропиточных масс (гл. 6, § 35), сопровождающееся возрастанием проводимости и резким сокращением срока службы бумажных конденсаторов, пропитанных этими массами (рис. 34, а).

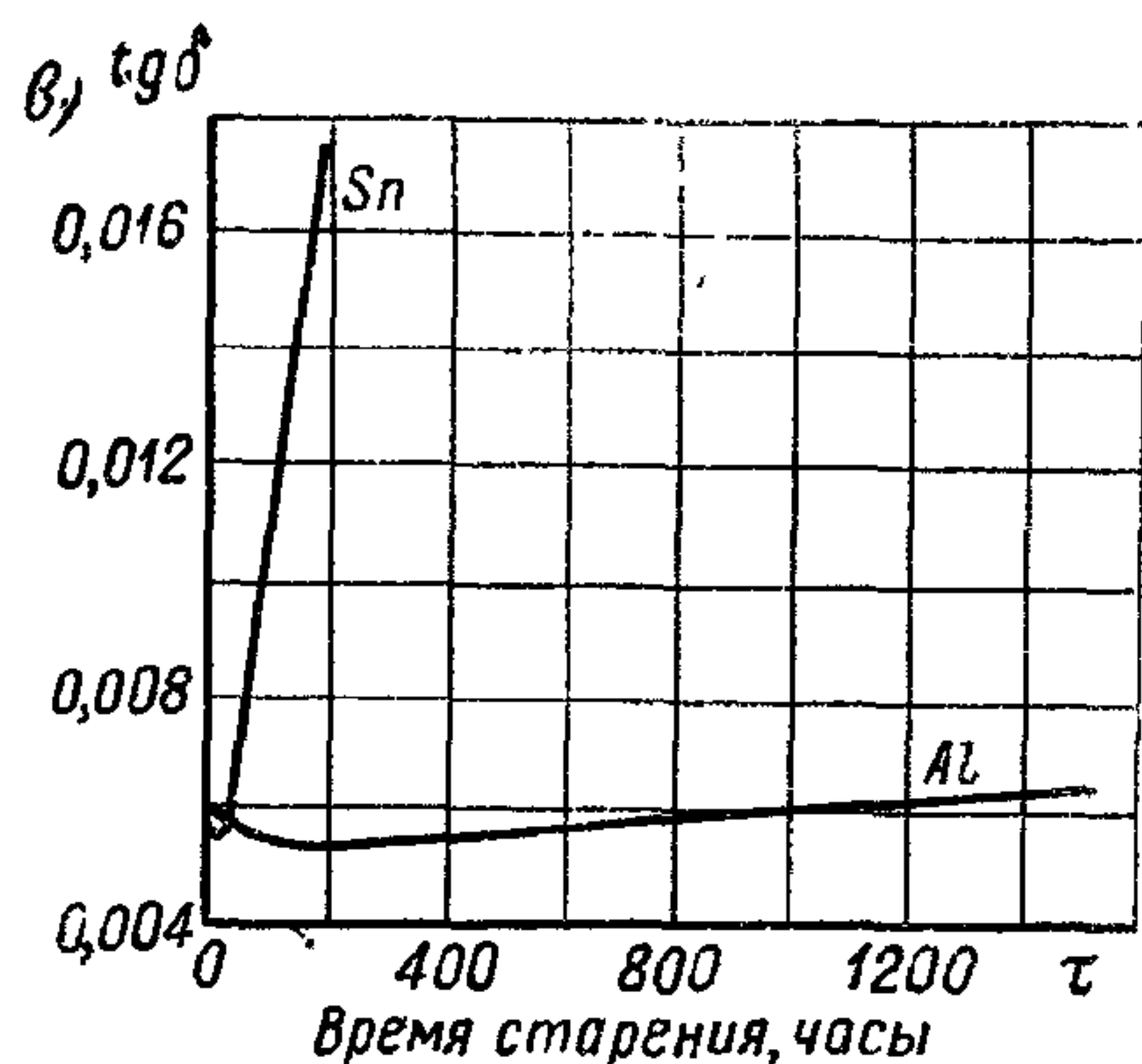
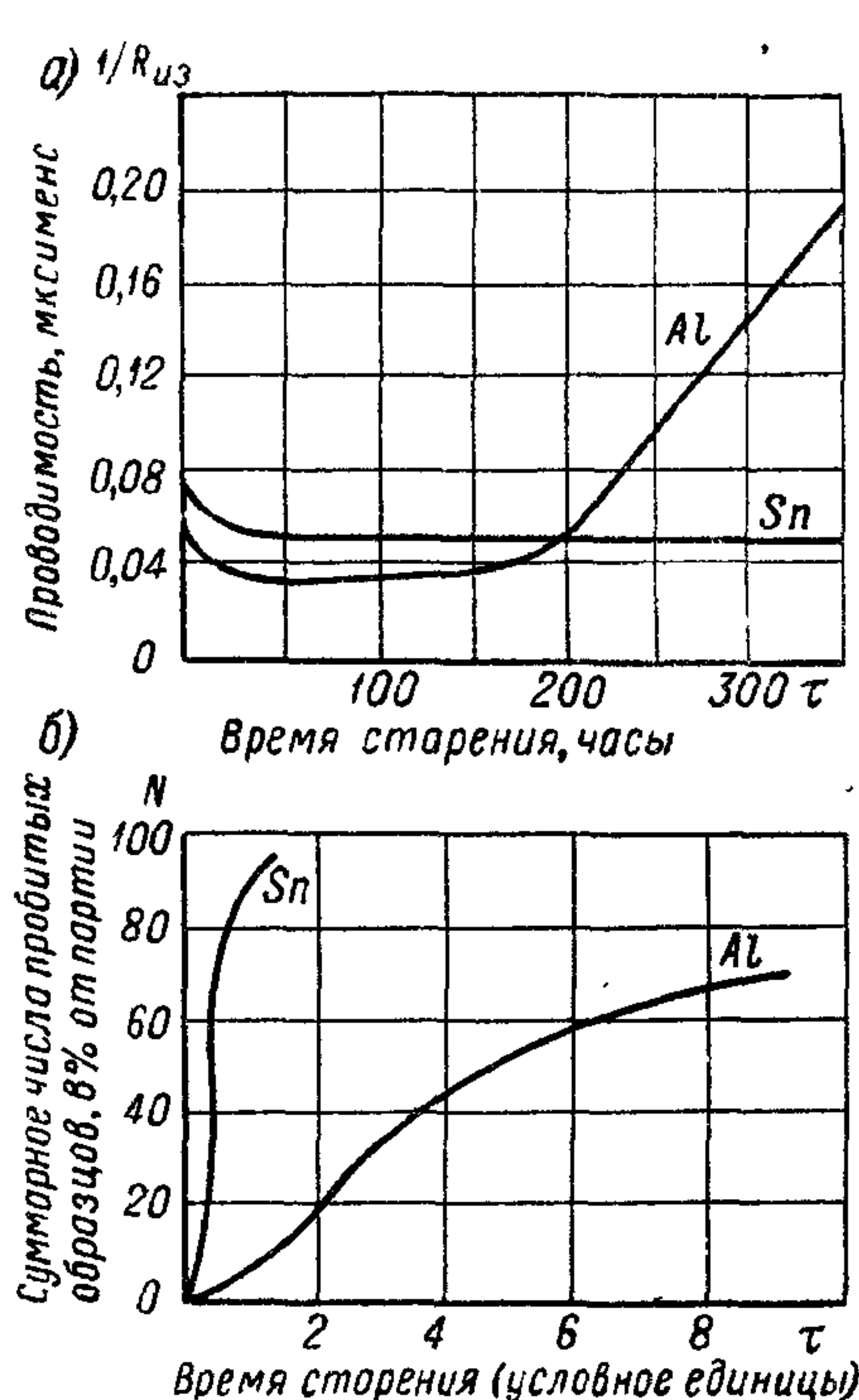


Рис. 34. Влияние материала обкладок на процесс старения бумажных конденсаторов: а — пропитка хлорированной массой, старение при постоянном напряжении; б — пропитка углеводородной массой, старение при постоянном напряжении; в — пропитка хлорированной массой, старение при переменном напряжении; Al — алюминиевая фольга; Sn — оловянно-свинцовая фольга.

При этом на поверхности фольги, особенно той, которая служит обкладкой, находящейся при положительном потенциале (анодном), наблюдается сильное коррозионное разрушение. Явление коррозии алюминиевой фольги было замечено также при испытании конденсаторов из триацетатной пленки при 100°C и постоянном напряжении.

При пропитке неполярными углеводородными массами и постоянном напряжении бумажные конденсаторы с алюминиевыми обкладками, наоборот, оказываются более устойчивыми, чем конденсаторы с обкладками из оловянно-свинцовой фольги; возможно, что в данном случае сказывается благоприятное влияние естественной оксидной пленки на поверхности алюминия (рис. 34, б). При переменном напряжении, когда электролитические процессы в диэлектрике не имеют места, было также отмечено преимущество

алюминиевой фольги перед оловянно-свинцовой в отношении большей стабильности электрических характеристик конденсаторов и большего срока службы, даже при пропитке хлорированными массами (рис. 34, в).

Можно ожидать сильного влияния нелуженой медной фольги на процессы старения неполярных углеводородных масс при повышенной температуре; поэтому при использовании такой фольги как для обкладок, так и в качестве выводных контактов ее следует защищать слоем олова, которое все же менее опасно, чем медь.

При использовании обкладок в виде металлической фольги, даже при сильном сжатии конденсаторных секций, неизбежно появление зазоров между диэлектриком и обкладкой, которые заполнены воздухом в непропитанном конденсаторе и пропиточной массой — в пропитанном. Подобные зазоры образуют некоторую емкость, включенную последовательно с емкостью слоев диэлектрика и снижающую

эффективное значение диэлектрической проницаемости диэлектрика (рис. 35). Если обозначить емкость слоев диэлектрика через C_d и емкость зазоров через C_z , то согласно формуле (16) результирующая емкость конденсатора будет равна

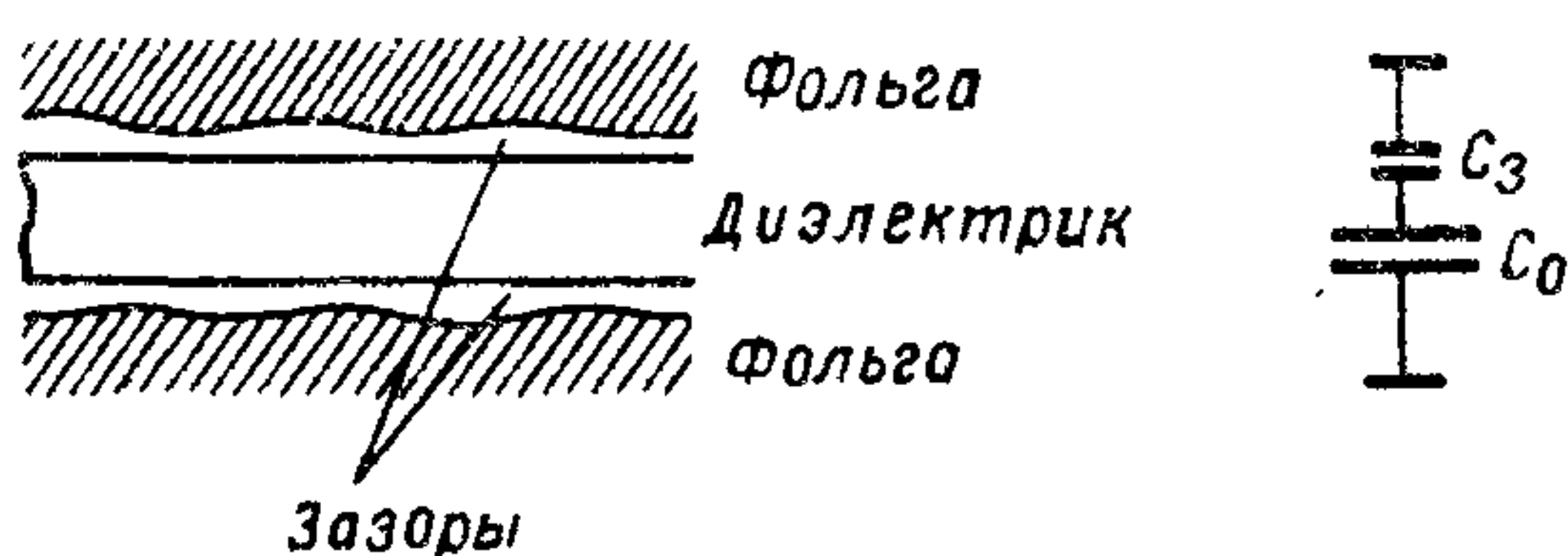


Рис. 35. Зазоры между обкладкой из фольги и диэлектриком: C_d — емкость диэлектрика; C_z — емкость зазора.

$$C = \frac{1}{1/C_d + 1/C_z} = \frac{C_d C_z}{C_d + C_z} = \frac{C_d}{1 + C_d/C_z}. \quad (85)$$

Таким образом, наличие емкости зазора C_z снижает C в сравнении с C_d и тем больше, чем меньше емкость зазора, т. е. чем его толщина больше. Это приводит к соответствующему уменьшению эффективной диэлектрической проницаемости. Поскольку всякая пропиточная масса имеет ϵ выше, чем у воздуха, эффективная диэлектрическая проницаемость (и емкость C) после пропитки при наличии зазоров всегда несколько увеличивается, даже если сам диэлектрик (как в случае слюдяных или пленочных конденсаторов) не впитывает пропиточную массу.

Наличие зазоров, заполненных пропиточной массой, приводит к появлению междуслойной поляризации (§ 8) и, как уже упоминалось выше, увеличивает коэффициент абсорбции конденсатора (§ 14). Наличие междуслойной поляризации вызывает появление зависимости емкости от частоты в области низких частот (рис. 29, выше). Наличие зазоров, заполненных как воздухом, так и жидкой пропиточной массой, может приводить к заметному увеличению потерь энергии в конденсаторах. Изменения размеров зазора при

расширении и сжатии конденсатора, вызванных колебаниями температуры, приводят к дополнительным изменениям емкости с температурой; если изменения размеров зазора будут носить остаточный характер, то это приведет к необратимым изменениям емкости конденсатора.

В и б р а ц и я м е т а л л и ч е с к и х ф о л ь г о в ы х о б -
к л а д о к при воздействии переменного электрического поля может вызвать также существенное увеличение потерь энергии в конденсаторах и требует применения достаточно сильного сжатия конденсаторных секций, чтобы устранить эту причину повышенных потерь. Сжатие секций позволяет уменьшить толщину зазоров, увеличить значения емкости C_z и ослабить вредное влияние зазора как на величину, так и на стабильность емкости. Удельное давление, достигаемое при сжатии конденсаторных секций в специальных обжимках (см. ниже § 64), при использовании в качестве диэлектрика твердого малосжимаемого материала, как например слюды, составляет 50—150 кГ/см^2 ; при прессовке секций бумажных конденсаторов с обкладками из фольги (§ 78) удельное давление составляет от 1,5—2 до 5—10 кГ/см^2 .

Для получения указанных здесь удельных давлений приходится использовать относительно массивные обжимки или стягивающие приспособления, увеличивающие заметно объем и вес конденсатора. В связи с этим во многих случаях изготовления конденсаторов с обкладками из фольги, когда к стабильности емкости и величине угла потерь не предъявляется особо высоких требований, особенно при изготовлении конденсаторов малой емкости, от использования обжимок и сжатия конденсаторных секций производство отказывается.

§ 22. Металлизация диэлектрика

Устранение недостатков, связанных с наличием зазора между диэлектриком и обкладкой, можно осуществить **м е т а л л и з а -**
ц и е й д и э л е к т р и к а, т. е. непосредственным нанесением тонкого слоя металла на поверхность материала, используемого в качестве диэлектрика в конденсаторе. При этом достигается также значительная экономия металла, так как металлический слой на поверхности диэлектрика может иметь значительно меньшую толщину, чем металлическая фольга, от которой требуется определенная механическая прочность, чтобы исключить возможность ее обрывов при намотке или сборке конденсаторных секций.

Для металлизации диэлектриков в конденсаторостроении были предложены следующие методы: а) химический, б) вжигание, в) испарение в вакууме, г) катодное распыление.

Х и м и ч е с к и й м е т о д применялся ранее для серебрения слюды, причем на поверхности этого диэлектрика тонкий слой серебра создавался за счет его осаждения из раствора AgNO_3 с присадками аммиака и щелочи при добавлении к этой основной

смеси восстановительного раствора, содержащего небольшие количества серной кислоты, сахара и спирта. Недостатками этого метода являлись: необходимость погружения диэлектрика в раствор, неизбежно приводящая к следам электролита на поверхности диэлектрика, что ухудшало его свойства (даже при тщательной промывке); необходимость предварительной относительно сложной подготовки поверхности слюды для улучшения ее сцепления с серебром; зависимость процесса химического серебрения от температуры окружающей среды. Поэтому метод вышел из употребления.

Метод вжигания заключается в нанесении на поверхность диэлектрика специальной пасты, содержащей мелкодиспергированный металл или его соединения и органическую связку, с последующей сушкой для удаления летучих компонентов связки и обжигом при высокой температуре, достаточной для сгорания твердых частей органической связки и образования слоя металла, плотно закрепленного на поверхности диэлектрика. Очевидно, что этот высокотемпературный метод металлизации непригоден для производства конденсаторов с органическим диэлектриком.

В течение ряда лет метод вжигания применялся в СССР для серебрения слюды, причем обычно использовалась паста, состоящая из 35—40% AgCO_3 и 65—60% канифольного лака (50%-ный раствор канифоли в скипидаре); добавка окиси висмута Bi_2O_3 до 0,4—0,5% от веса пасты способствовала улучшению сцепления серебра со слюдой и позволяла несколько снизить температуру обжига. Обычное значение температуры при обжиге слюды составляло от 480—490 до 520—540° С.

Серебро было выбрано как металл устойчивый к окислению и обладающий наименьшим удельным сопротивлением, а также достаточно высокой температурой плавления (см. табл. 1). Толщина слоя серебра на слюде при использовании метода вжигания составляла 2—2,5 мкм. В настоящее время отечественное конденсаторостроение перешло на серебрение слюды методом испарения в вакууме, который обеспечивает такое же качество слюдяного серебряного конденсатора при меньшей толщине серебряной обкладки, порядка 1 мкм; это дает в условиях массового производства значительную экономию серебра. Некоторые зарубежные фирмы и сейчас еще применяют в производстве слюдяных конденсаторов метод вжигания.

Этот метод металлизации широко применяется в производстве керамических конденсаторов. В состав пасты для серебрения керамики, кроме AgCO_3 и Bi_2O_3 , вводят еще борат свинца PbB_4O_7 ; органической связкой также служит канифольный лак; температуру обжига при серебрении керамики обычно поднимают до 800—850° С.

При однократном серебрении получают толщину слоя серебра порядка 7—12 мкм. В ряде случаев для уменьшения сопротивления слоя в производстве высокочастотных конденсаторов,

рассчитанных на относительно большие токи, применяют двух- и даже трехкратное серебрение, получая толщину слоя соответственно 12—18 и 15—25 *мкм*.

При достаточно большой толщине серебряной обкладки выводы конденсатора в виде отрезков проволоки или медных луженых лент могут быть непосредственно припаяны к обкладке.

При изготовлении нового типа **м о н о л и т н ы х к е р а м и ч е с к и х к о н д е н с а т о р о в** обкладки должны быть нанесены не на обожженную керамическую заготовку, как в производстве обычных конденсаторов, а на «сырые» керамические пленки, которые проходят обжиг уже в металлизированном виде. Поскольку температура обжига керамики составляет порядка 1300—1400° С и выше, применение серебра, имеющего точку плавления 960° С, в данном случае уже не допустимо и приходится заменять его в составе пасты для металлизации такими тугоплавкими неокисляющимися металлами, как **п л а т и н а** или **п а л л а д и й**. Для керамики обычно применяемых составов обжиг производится в окислительной среде, а потому использование таких тугоплавких, но недостаточно стойких к окислению металлов, как **н и к е л ь**, **в о л ь ф р а м** или **м о л и б д е н**, оказывается невозможным. Разработка таких керамических масс, которые будут допускать применение «восстановительного» обжига без ухудшения своих электрических свойств, позволит заменить этими металлами дорогие и дефицитные благородные тугоплавкие металлы в производстве керамических конденсаторов.

Следует отметить, что недостатком серебра как материала для обкладок конденсатора является не только недостаточно высокая температура плавления, но и склонность этого металла к **м и г р а ц и и**.

Когда серебро находится в контакте с диэлектриком и к нему приложен положительный потенциал, то ионы серебра могут проникать как в толщу диэлектрика (двигаясь к отрицательному электроду), так и перемещаться по его поверхности, откладываясь далее в отдельных участках объема или поверхности диэлектрика в виде металлических атомов. Это свойство особенно присуще серебру как металлу, относительно легко поддающемуся анодному растворению. Миграция серебра усиливается при наличии влажности и следов хлора, а также при высоких температурах.

Особенно легко серебро проникает в органические диэлектрики, но при увлажнении этот процесс может иметь место и для неорганических диэлектриков типа керамики или слюды. В случае титаносодержащей керамики проникновение серебра в толщу диэлектрика приводит к восстановлению TiO_2 с образованием полупроводящих веществ; при этом постепенно снижается сопротивление изоляции керамического конденсатора и возникает опасность его пробоя, когда этот процесс охватит достаточную часть общей тол-

щины диэлектрика (рис. 36). При высокой влажности наблюдались отдельные случаи миграции серебра в слюду с образованием дендритообразных отложений серебра внутри слюды. Для слюдяных конденсаторов, защищенных пластмассовой опрессовкой, миграция серебра внутрь слюды маловероятна, но при воздействии постоянного напряжения и высокой температуры возможны отдельные случаи миграции серебра по закраине; можно думать, что разряд по закраине может произойти и при переходе серебра со слюды на пластмассу.

В связи с этим серебро нельзя считать вполне удовлетворительным материалом для металлизации неорганических

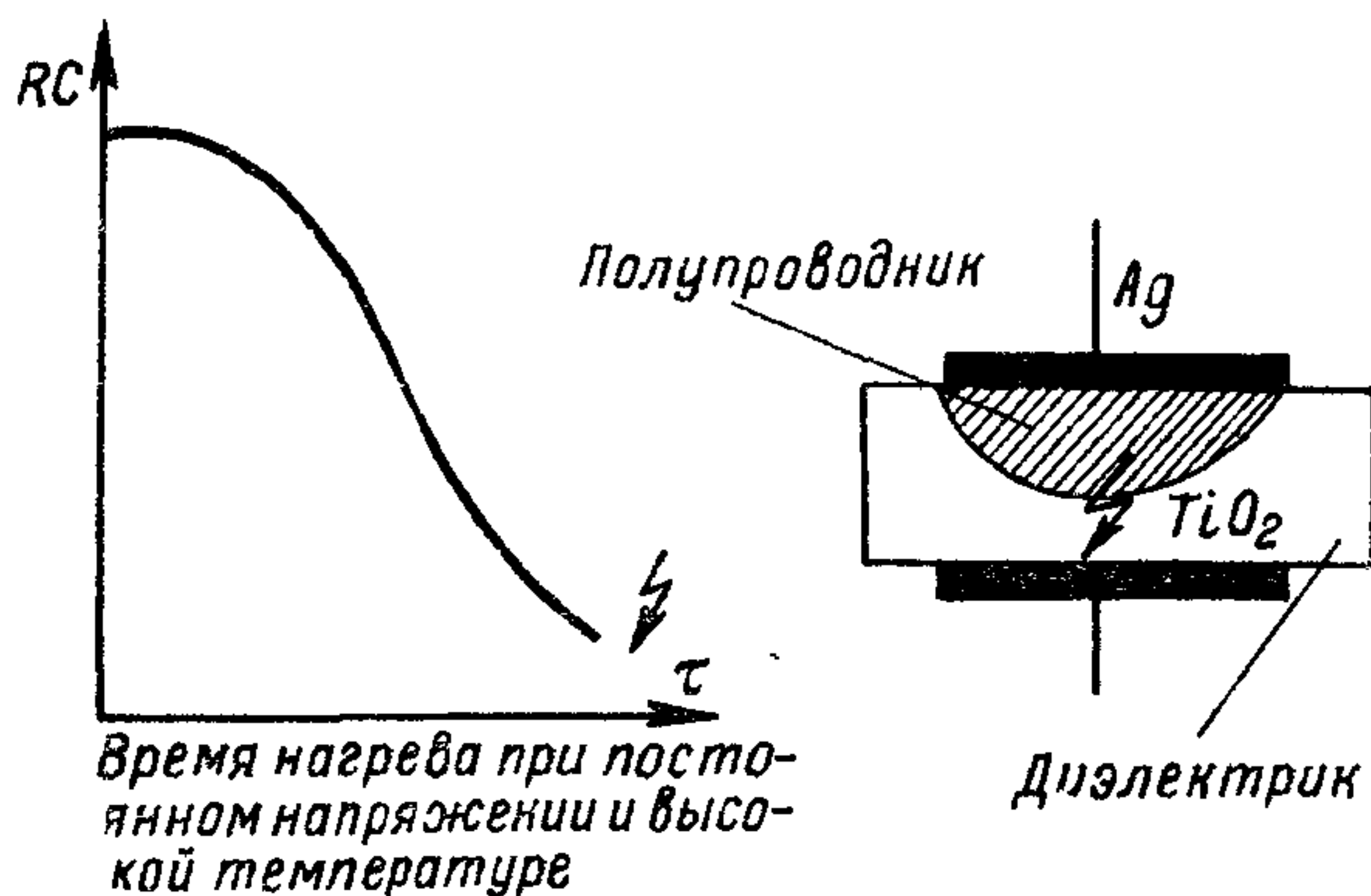


Рис. 36. Старение титановой керамики при постоянном напряжении и высокой температуре. Слева — зависимость постоянной времени от продолжительности старения; справа — схема образования слоя полупроводника у анодной обкладки.

диэлектриков, и проблема замены этого металла является актуальной.

При небольшом объеме производства конденсаторов нанесение пасты на поверхность конденсаторных заготовок производилось кисточкой вручную. В современном массовом производстве для серебрения керамических конденсаторов применяются специальные автоматы.

Метод испарения металла в вакууме заключается в нагреве определенной порции металла в вакуумной камере, испарении его и осаждении паров металла на поверхности диэлектрика, также находящегося в вакуумной камере. Применение вакуума (остаточное давление порядка 10^{-1} — 10^{-4} мм рт. ст.) обеспечивает отсутствие окисления испаряемого металла, снижение его точки кипения и получение прямолинейного движения атомов металла от испарителя к поверхности диэлектрика. Этот метод металлизации пригоден как для неорганических, так и для органических диэлектриков.

Значения температуры кипения некоторых металлов при остаточном давлении 10^{-2} мм рт. ст. приводятся ниже:

Кадмий	260° С
Цинк	340° С
Алюминий	1000° С
Серебро	1050° С
Медь	1270° С
Олово	1350° С

Метод испарения в вакууме широко применяется для серебрения слюды в конденсаторном производстве. В качестве примера можно отметить, что при атмосферном давлении температура кипения серебра составляет 1955°C т. е. почти в 2 раза выше, чем при 10^{-2} мм рт. ст.

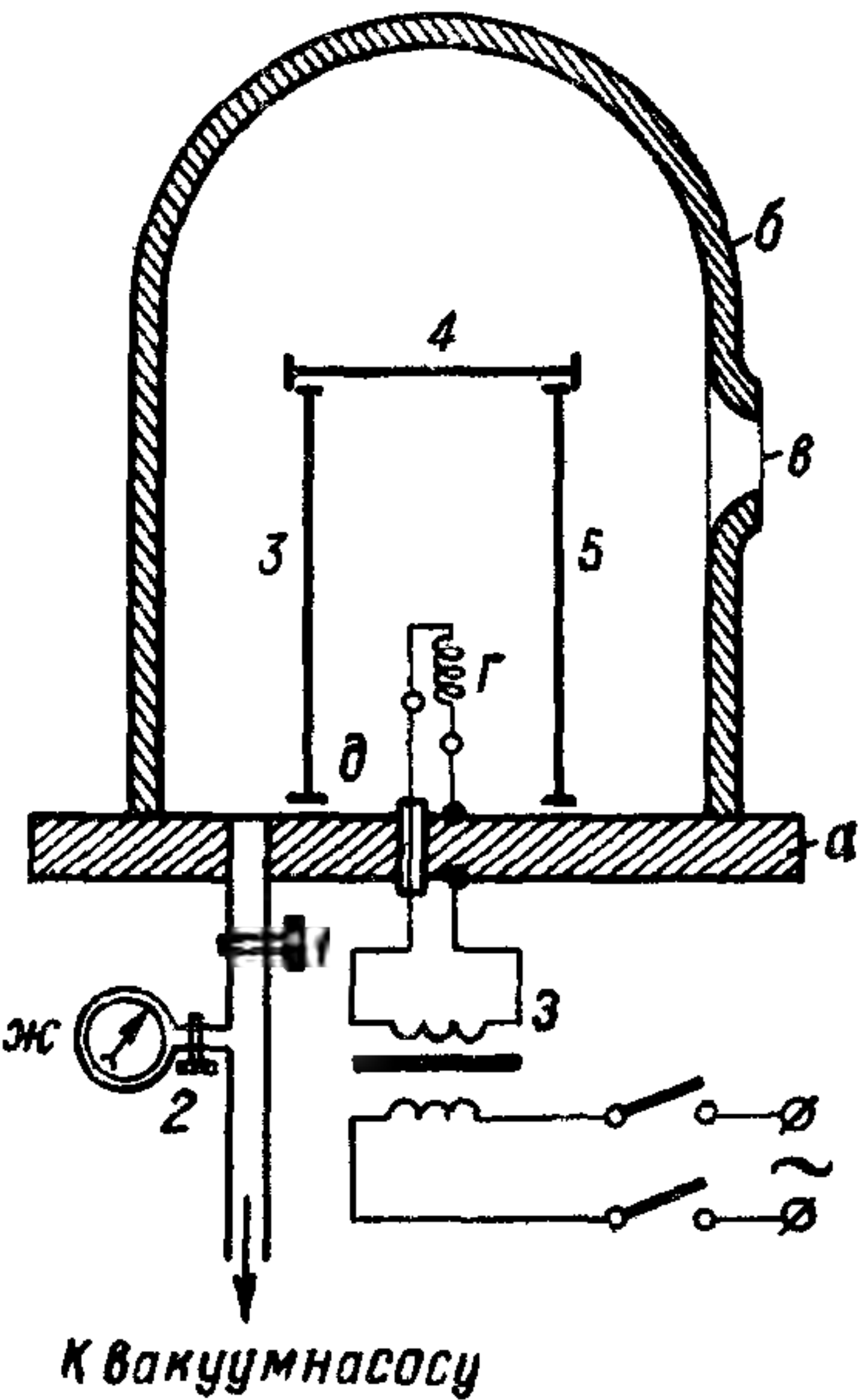


Рис. 37. Схема установки для серебрения слюды вакуумным методом: а — основная плита; б — вакуумный колпак; в — смотровое окно; г — нагреватель; д — ввод, изолированный от основания; ж — вакуумметр; з — понижающий трансформатор.
1, 2 — краны; 3, 4, 5 — рамки со слюдой.

Сняв колпак, вынимают и разбирают рамки, извлекая из них посеребренную слюду. Для закрепления серебряного слоя иногда производят прогрев пластинок при $200\text{--}250^{\circ}\text{C}$ в течение 20—30 мин.

На схеме рис. 37 предусмотрено покрытие слюды серебром только с одной стороны; поэтому приходится повторять процесс дваж-

Схема установки для серебрения слюды вакуумным методом показана на рис. 37. Вокруг спиралей или полосок из тугоплавкого металла, служащих для расплавления серебра, располагают железные рамки, в которые заложены пластинки слюды. Рамки закрывают края слюды с таким расчетом, чтобы получить нужный размер закраин (минимум 0,5—1 мм). Перед закладкой в рамки слюду промывают сначала 25%-ным водным раствором аммиака, затем дистиллированной водой и просушивают в течение 30 мин при 200°C . Иногда предварительную подготовку поверхности слюды производят обработкой ее газовым разрядом. После монтажа рамок опускают колокол установки и ведут откачку до получения остаточного давления порядка $10^{-3}\text{--}10^{-4}$ мм рт. ст. На это требуется время до 10—15 мин. Далее включают нагрев спиралей и производят серебрение, что занимает 2—3 мин. Потом выключают нагрев спиралей и снимают вакуум, открыв кран 1 и поставив кран 2 на соединение с воздухом. Сняв колпак, вынимают и разбирают рамки, извлекая из них посеребренную слюду. Для закрепления серебряного слоя иногда производят прогрев пластинок при $200\text{--}250^{\circ}\text{C}$ в течение 20—30 мин.

ды, чтобы получить двухстороннее серебрение. Практически для ускорения производства предусматривается двухстороннее серебрение за счет расположения рамок в несколько рядов и помещения нескольких нагревающих серебро спиралей в промежутках между рамками. В некоторых установках предусматривается возможность поворачивать на 180° рамки со слюдой, не извлекая их из-под колокола с тем, чтобы осуществить покрытие серебром второй стороны пластинок.

При хорошем качестве серебрения слой серебра на слюде должен быть блестящим, светлым и не просвечивать при просмотре

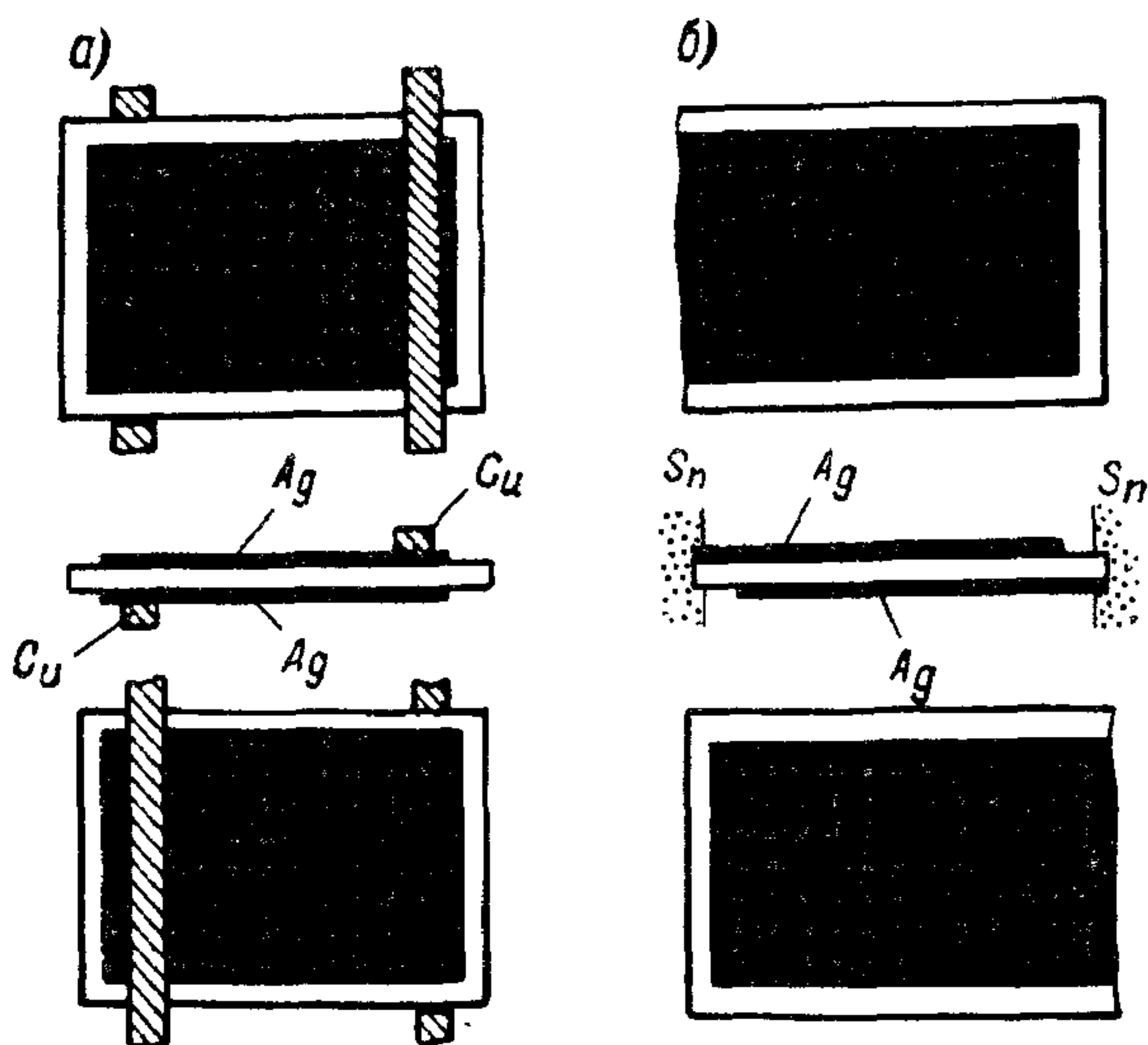


Рис. 38. Схемы контактирования с серебряным слоем на слюде: а — вкладные контакты из медной фольги; б — нанесение слоя оловянного сплава на торцы собранной секции.

«на просвет». Сопротивление слоя на пластинке колеблется от нескольких сотых до десятых ома, что соответствует толщине слоя менее 1 *мкм*. Для присоединения слоя (обкладки) к выводам конденсатора обычно применяют вспомогательные контакты из медной (реже из оловянно-свинцовой) фольги (рис. 38, а). Эти контактные полоски фольги загибают затем вдоль торца на верхнюю поверхность секции и зажимают скобой, соединенной с выводным проводником. Некоторые фирмы применяют сборку секций из серебряных пластинок слюды с таким расчетом, чтобы к одному торцу секции смещалась обкладка одного знака, а к другому торцу — другого знака (рис. 38, б). Противоположные торцы секций металлизировются методом распыления металла (обычно оловянно-свинцовым сплавом), после чего к слою металла на торцах секций припаивают выводные проводники.

Вакуумный способ серебрения позволяет получать слюдяные конденсаторы высокого качества. Недостатками его являлись трудоемкость операций сборки и разборки рамок и затрата времени на откачку. Эти недостатки преодолеваются разработкой полуавтоматов для набора слюды в рамки (и для извлечения серебряной слюды из рамок) и применением мощных вакуумных насосов, позволяющих ускорить откачку. В настоящее время этот метод, позволяющий заметно снизить расход серебра в сравнении с методом вжигания, является, как отмечалось выше, основным методом серебрения слюды.

При металлизации органических диэлектриков, имеющих вид длинных тонких лент, намотанных в рулоны (конденсаторной бумаги, синтетической пленки), имеется возможность вести процесс, непрерывно пропуская движущуюся ленту над испарителем до тех пор, пока с отдающего рулона исходной ленты весь материал не будет перемотан на приемный рулон металлизированной ленты. После этого надо снять вакуум, вынуть из установки рулон металлизированного материала и поставить на металлизацию новый рулон еще не металлизированной бумаги или пленки.

Схема установки для металлизации конденсаторной бумаги цинком показана на рис. 39. Цинк был выбран как металл с малой температурой кипения (см. выше), что снижает расход энергии, необходимой для его испарения. Еще меньшую температуру кипения имеет кадмий, но он значительно дороже цинка. В парах цинка можно получать высокую молекулярную интенсивность, затрудняющую проникновение молекул остаточных газов в глубь струи паров цинка и взаимодействие молекул газов с молекулами цинка. В связи с этим при металлизации цинком можно не добиваться особо высокого вакуума; обычно допускается работа при остаточном давлении порядка 10^{-2} — 10^{-1} мм рт. ст.

Недостатком цинка является низкое значение критической температуры $t_{кр}$, при которой происходит надежное сцепление металла с поверхностью диэлектрика при металлизации методом вакуумного испарения. Для цинка $t_{кр}$ лежит ниже -60°C , а потому при положительных температурах, при которых ведут металлизацию, получить слой цинка удовлетворительного качества на бумаге или пленке не удастся.

Это затруднение преодолено путем предварительного нанесения на ленту диэлектрика перед ее металлизацией цинком весьма тонкого подслоя из металла, обладающего повышенной температурой кипения и соответственно более высокой критической температурой: серебра или олова. При металлизации цинком толщина слоя весьма невелика; ранее обычно применяли слой с проводимостью порядка $1\text{ ом}^{-1}\text{ см/см}$, что соответствует толщине слоя порядка $0,1\text{ мкм}$; теперь чаще применяют слои с проводимостью порядка $0,3$ — $0,5\text{ ом}^{-1}\text{ см/см}$, что дает соответственно сниженную толщину слоя; толщина подслоя из тугокипящего металла

составляет всего лишь около 1% от толщины слоя цинка. В связи с этим расход металла для создания подслоя и количество энергии, необходимой для его испарения, весьма малы.

Как показано на рис. 39, бумага, предварительно покрытая слоем лака, сматывается с рулона B_1 , проходит по системе роли-

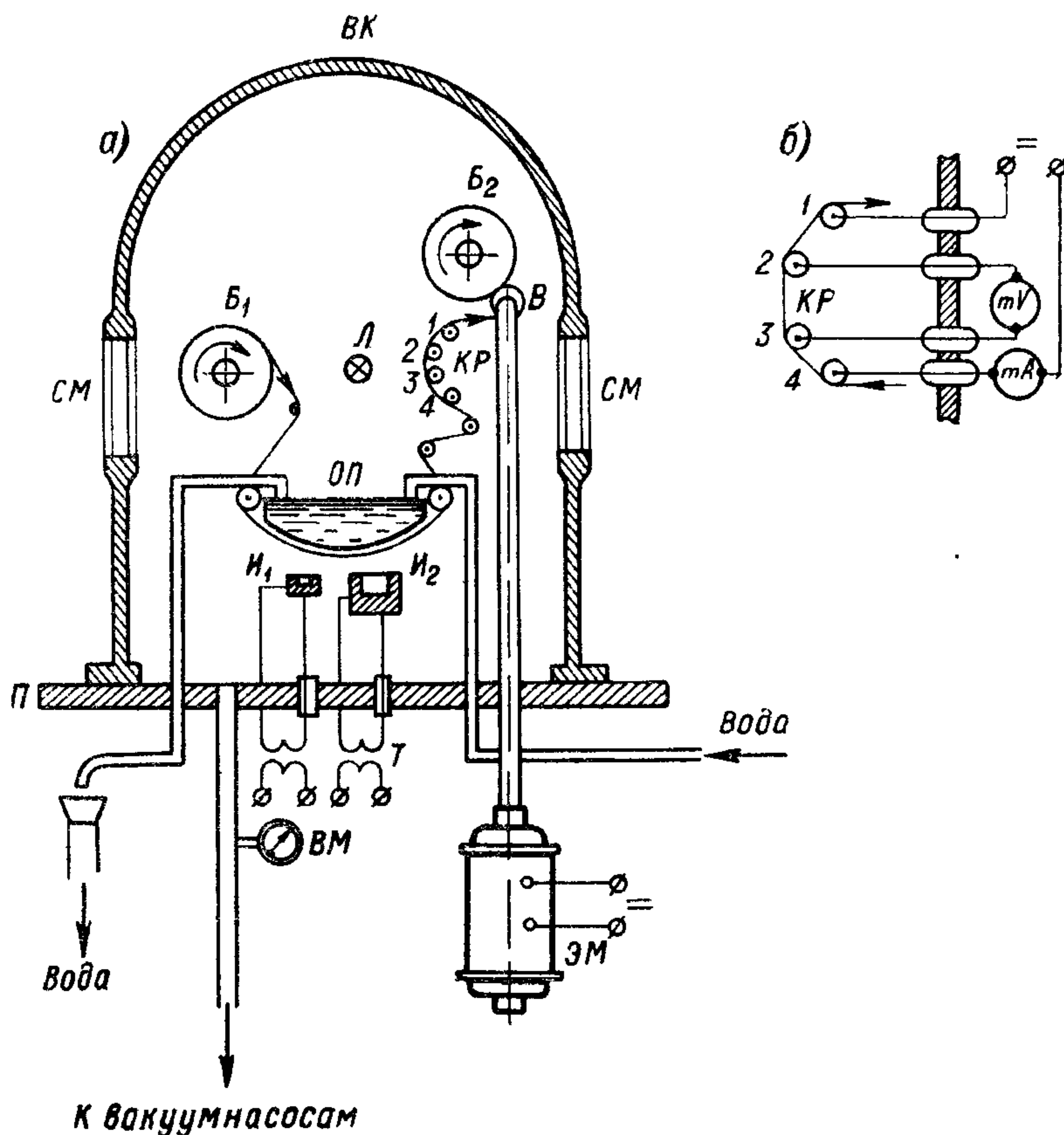


Рис. 39. Схема установки для металлизации конденсаторной бумаги цинком: Π — основная плита; ВК — вакуумный колпак; СМ — смотровые окна; B_1 — рулон лакированной бумаги; B_2 — рулон металлизированной бумаги; Л — лампа; КР — контактные ролики для контроля проводимости слоя (см. схему справа); В — ведущий валик; I_1 — первый испаритель для подслоя (олово); I_2 — второй испаритель для основного слоя (цинк); Т — трансформаторы для нагрева испарителей; ВМ — вакуумметр; ЭМ — электродвигатель для привода ведущего валика.

ков, огибая охлаждающую подушку ОП, к ведущему валику В и наматывается на рулон B_2 с постоянной линейной скоростью. Проходя под подушкой, бумага покрывается сначала подслоем тугоплавящего металла из испарителя I_1 , а потом слоем цинка из испарителя I_2 . Конденсация паров цинка происходит на лакированной стороне бумаги. Назначение лакировки будет рассмотрено

ниже (§ 81). Контроль толщины слоя в процессе металлизации производится визуально, через смотровое окно СМ (с задней стороны бумага в этом месте освещается лампой Л) или с помощью измерения проводимости слоя на участке между контрольными роликами 1, 2, 3, 4 (рис. 39, б).

Другим недостатком цинка при его использовании в качестве основного материала для обкладок металлобумажного или металлопленочного конденсатора является малая устойчивость против окисления и коррозии. Поэтому сколь-нибудь длительное хранение металлизированной цинком бумаги (или пленки) на воздухе недопустимо.

Даже при относительной влажности воздуха 60—70% можно заметить постепенное возрастание сопротивления металлического слоя, свидетельствующее об его разрушении; при высокой влажности этот процесс идет достаточно быстро (рис. 40).

Этим недостатком не обладает алюминий, а потому некоторые зарубежные фирмы применяют покрытие бумаги и синтетических пленок алюминием; в связи с тем, что бумага, металлизированная алюминием, допускает длительное хранение, оказывается возможным ставить процесс металлизации непосредственно на бумажной фабрике и использовать в конденсаторостроении готовую металлизированную бумагу. Преимуществом алюминия является также меньшая величина удельного сопротивления. При покрытии алюминием не нужен подслой из другого металла.

Недостатками, связанными с металлизацией алюминием, являются: повышенный расход энергии на испарение металла в связи с его повышенной температурой кипения и необходимость работать при высоком вакууме (остаточное давление порядка 10^{-4} мм рт. ст.). Кроме того, при высокой температуре алюминий активно реагирует с большинством нагревостойких материалов, которые могли бы быть использованы для изготовления тиглей для плавки и испарения этого металла. Задачу металлизации алюминием удалось решить только при отказе от использования тиглей и переходе к стержневым нагревателям, на которые непрерывно подается алюминиевая проволока, которая плавится и испаряется, соприкасаясь с нагревателем; последний приходится периодически заменять, так как он постепенно разрушается при соприкосновении с алюминием.

Отечественная методика металлизации алюминием разработана и начинает применяться при изготовлении ряда типов конденсаторов. Для менее ответственных и более дешевых типов металли-

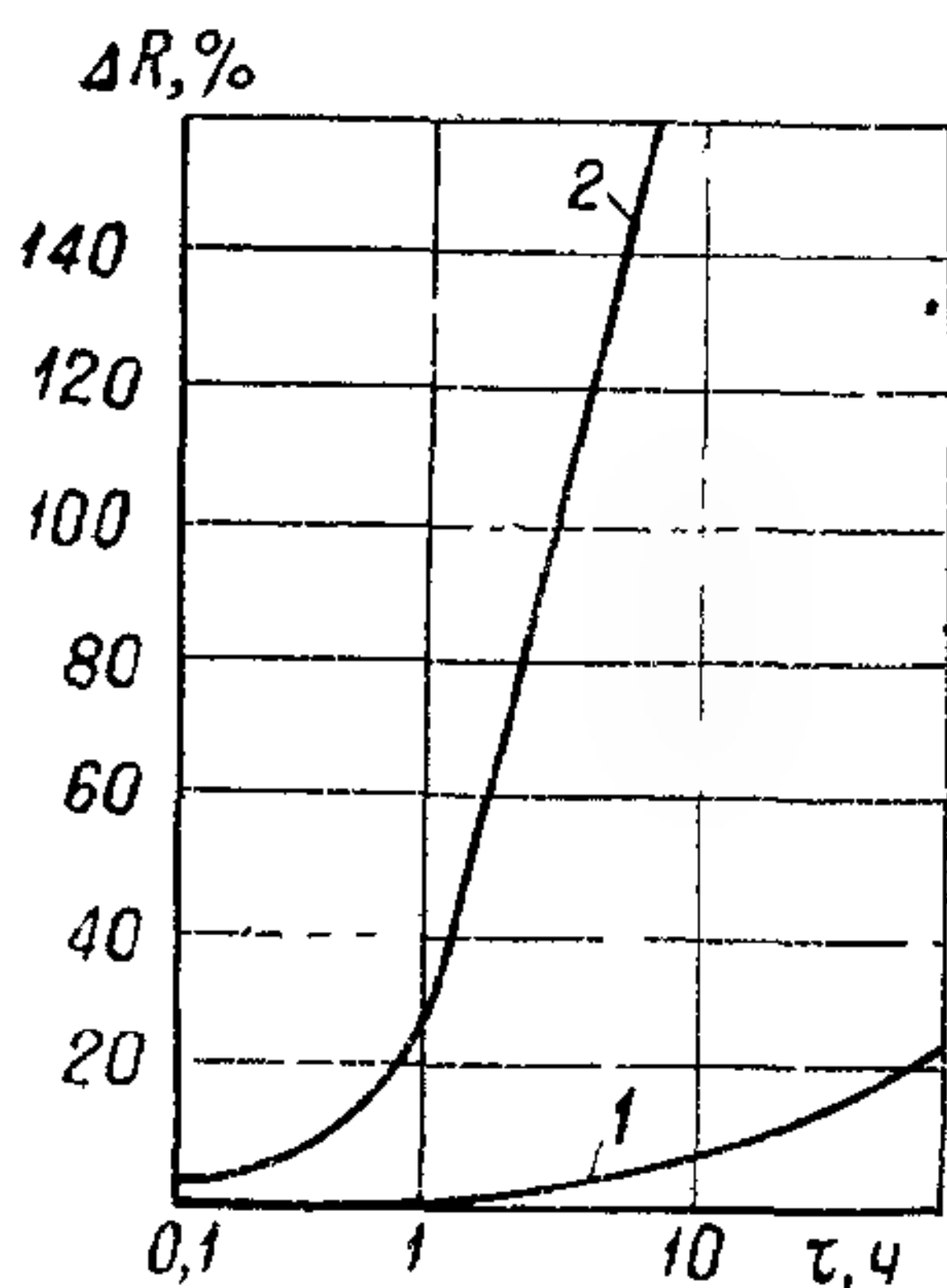


Рис. 40. Зависимость приращения сопротивления слоя цинка на конденсаторной бумаге от времени хранения на воздухе.

1 — влажность 60—70%;
2 — влажность 98%.

зированных конденсаторов продолжается как у нас, так и за рубежом использование металлизации цинком.

При металлизации ленточных диэлектриков (бумаги, пленки) испарением в вакууме для получения изоляционных закраин применяют экраны в виде металлических лент, закрывающих некоторую часть ширины металлизированной ленты, движущейся в металлизационном аппарате. Обычно для металлизации применяется широкая лента, которая затем при перематке разрезается на более узкие с таким расчетом, чтобы с одного из краев ленты оставалась бы неметаллизированная закраина. Иногда вместо экранов используется нанесение на металлизированную ленту в нужных местах слоя масла, который препятствует осаждению металла на защи-

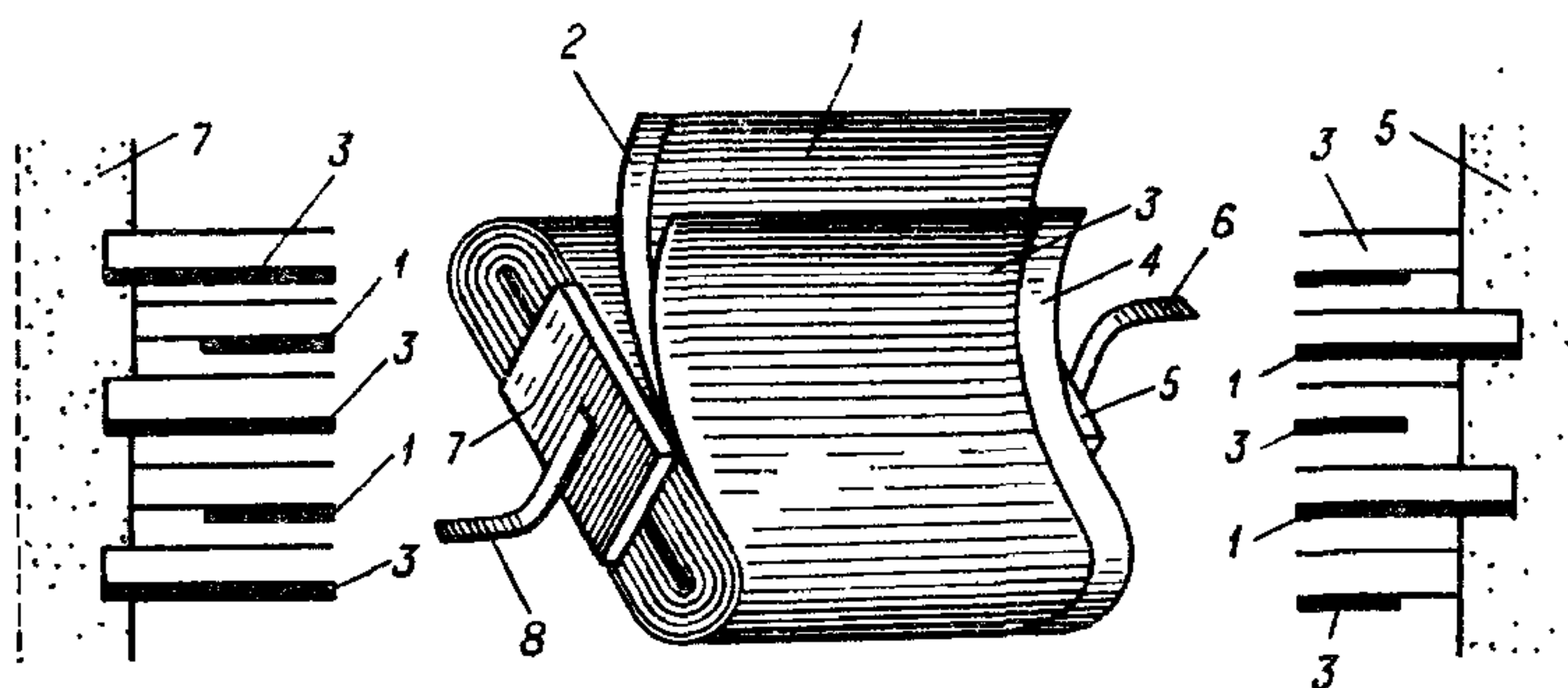


Рис. 41. Секция металлобумажного конденсатора.

1 — первая лента металлизированной бумаги; 2 — закраина первой ленты; 3 — вторая лента металлизированной бумаги; 4 — закраина второй ленты; 5 — контактная накладка, соединенная с металлическим слоем первой ленты; 6 — припаянный к этой накладке выводной проводник; 7 — накладка, контактирующая с металлом второй ленты; 8 — вывод от этой накладки.

щенной маслом поверхности. Закраины можно также создавать выжигая часть металлического слоя электрическим током.

Обычно применяется односторонняя металлизация. В этом случае при намотке конденсатора из двух лент они располагаются так, чтобы на одной ленте закраина была сдвинута к одному краю ленты, а на второй ленте — к противоположному краю (рис. 41). На торцы намотанных секций наносятся путем распыления («шоопирования») проводящие накладки из сплава ПОС, контактирующие с металлическими слоями каждой из лент. К накладке на каждом торце припаивают выводной проводник. Таким образом, секции конденсаторов с металлизированным диэлектриком подобны намотанным конденсаторам с выступающей фольгой («безындукционная намотка»). При металлизации бумаги алюминием для получения надежного контакта перед нанесением накладки из сплава ПОС производится предварительное напыление на торцы конденсаторных секций слоя цинка.

При односторонней металлизации лент диэлектрика, даже при однослойной намотке секций (из двух металлизированных лент, без

прокладки между ними неметаллизированного диэлектрика), остается зазор между диэлектриком и одной из обкладок (рис. 42, а). С отрицательным влиянием этого зазора на стабильность емкости металлобумажных конденсаторов можно не считаться; можно примириться и с небольшой потерей емкости, обусловленной этим зазором. При металлизации некоторых синтетических пленок, позволяющих получать высокую стабильность емкости (полистирол, поликарбонат), можно ставить вопрос о двухсторонней металлизации, полностью устраняющей зазоры между диэлектриком и обкладкой при однослойной намотке (рис. 42, б).

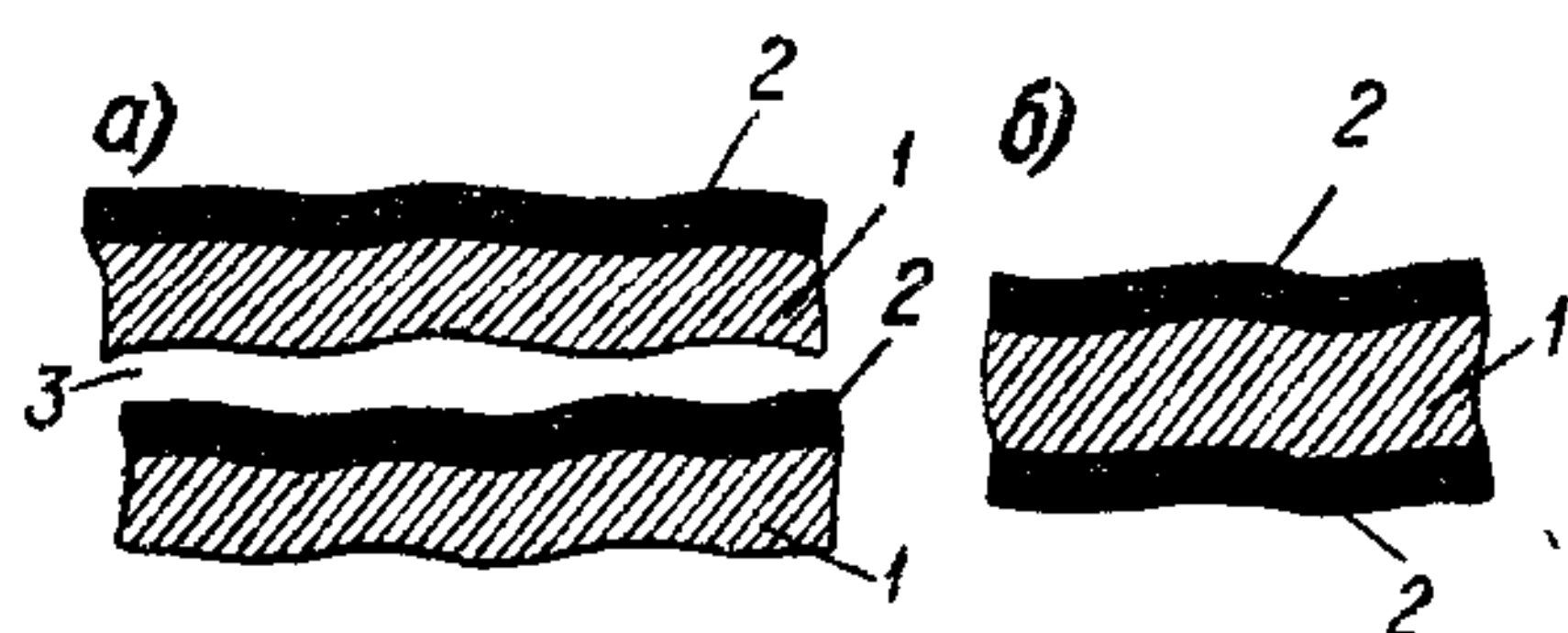


Рис. 42. Схема односторонней (а) и двухсторонней (б) металлизации.

1 — диэлектрик; 2 — металлический слой; 3 — зазор.

ностью устраняющей зазоры между диэлектриком и обкладкой при однослойной намотке (рис. 42, б).

Двухсторонне металлизированная лента представляет собой по существу уже готовый конденсатор с двумя обкладками. Однако намотать ее нельзя, так как после первого же витка произойдет короткое замыкание обкладок противоположного знака. При малых длинах лент (малая емкость) это затруднение можно преодолеть, применяя складывание лент «гармошкой», при большой длине надо наматывать конденсатор из двух одинаковых двухсторонне металлизированных лент, складывая их так, чтобы совпадали одноименные закраины в местах соприкосновения лент (рис. 43).

При двухсторонней металлизации надо удалять металл на концах лент, образуя закраину по ширине ленты, кроме обычно создаваемой закраины по длине ленты (рис. 43). Таким образом, как при односторонней, так и при двухсторонней металлизации приходится вести намотку из двух лент.

Вместе с тем, можно изготовлять и одноленточные металлизированные конденсаторы путем нанесения разноименных обкладок на одну и ту же сторону ленты диэлектрика, как показано на рис. 43, в.

Фигурная закраина между разноименными обкладками обеспечивается в процессе металлизации нанесением защитного слоя

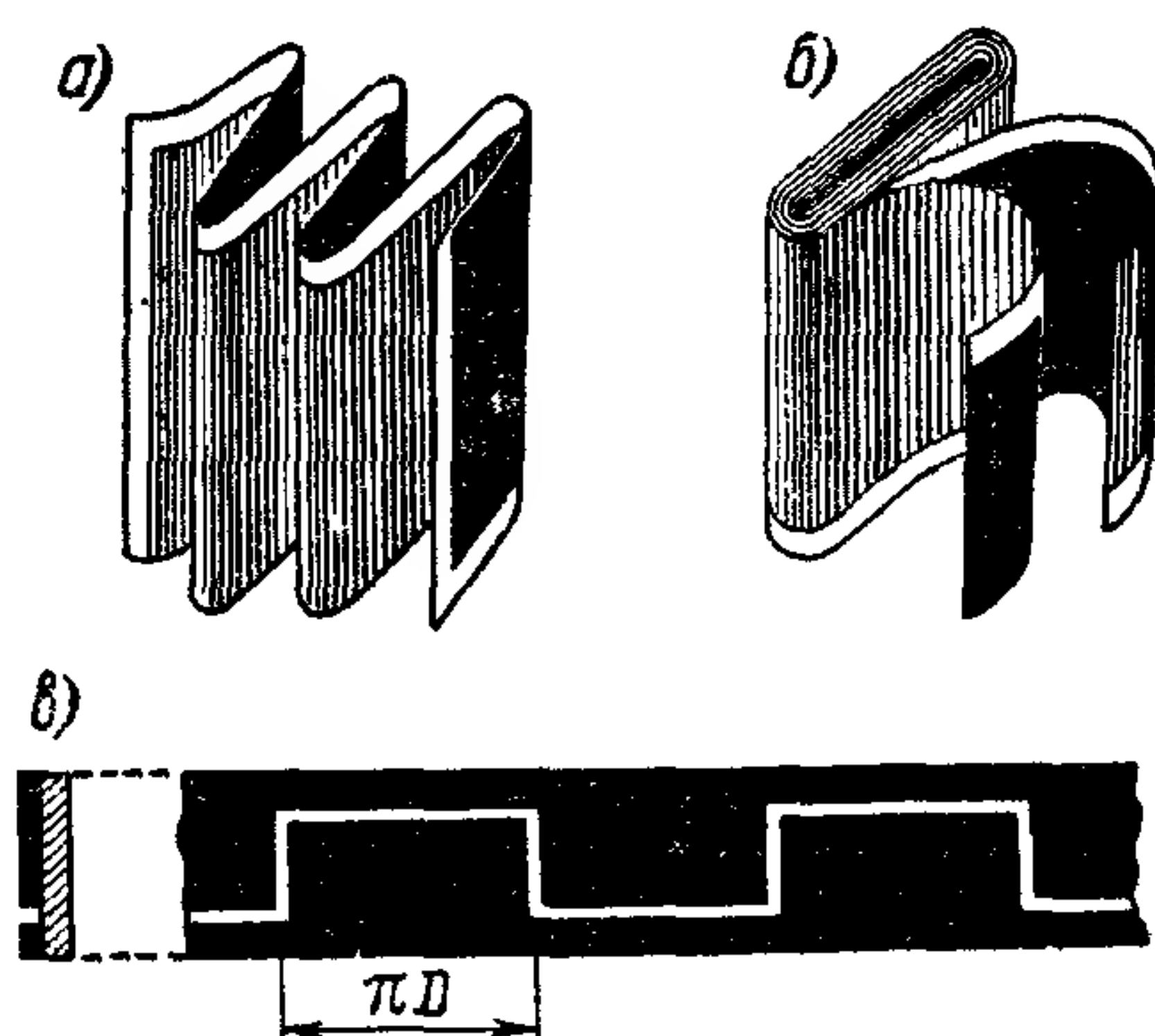


Рис. 43. Разные варианты металлизированных конденсаторов: а — двухсторонняя металлизация — секция образуется из одной ленты, складываемой «гармошкой»; б — двухсторонняя металлизация — секция намотана из двух лент; в — односторонняя металлизация с расчетом на намотку одноленточных конденсаторов.

масла с помощью специальных фигурных роликов или создается на металлизированной ленте путем выжигания на металлическом слое изолирующей «дорожки» с помощью локализованного электрического разряда. Для того чтобы при намотке разноименные обкладки перекрывались, создавая емкость, необходимо выбирать длину каждого элемента обкладки равной длине окружности поперечного сечения секции. В процессе намотки с увеличением длины намотанных витков диаметр секции увеличивается, что требует соответственного увеличения длин элементарных обкладок. Нанесение изолирующей дорожки с постепенным увеличением длины элементарных обкладок по длине металлизированной ленты затруднительно при больших значениях общей длины ленты (при больших емкостях). В связи с этим одноленточные металлизированные конденсаторы изготавливаются преимущественно с небольшими значениями номинальной емкости.

Метод катодного распыления металла применяется в тех случаях, когда высокая температура кипения тугоплавкого металла не позволяет успешно применить метод испарения в вакууме. Схема металлизации катодным распылением показана на рис. 44. В вакуумной камере помещают катод из распыляемого металла и анод, соединяемый с положительным зажимом источника высокого напряжения порядка нескольких киловольт. На аноде располагается подложка, на которую наносится слой распыляемого металла. Камера после откачки заполняется инертным газом, например аргоном, при давлении порядка $0,01—0,1$ мм рт. ст. Под действием электрического поля ионы инертного газа приходят в движение и, ударяясь о катод, выбивают из него атомы распыляемого металла, которые далее переносятся к аноду и отлагаются на подложке. Скорость создания металлического слоя этим методом невелика, порядка $1 \text{ \AA}/\text{сек}$, что значительно меньше, чем при вакуумном испарении. Поэтому метод катодного распыления используется относительно редко, главным образом в производстве тонкопленочных конденсаторов с неорганическим нагревостойким диэлектриком (§ 74), требующих применения обкладок из тугоплавкого металла. Толщина электродов в виду относительной медленности процесса их нанесения берется малой — порядка $0,1—0,2$ мкм и даже меньше.

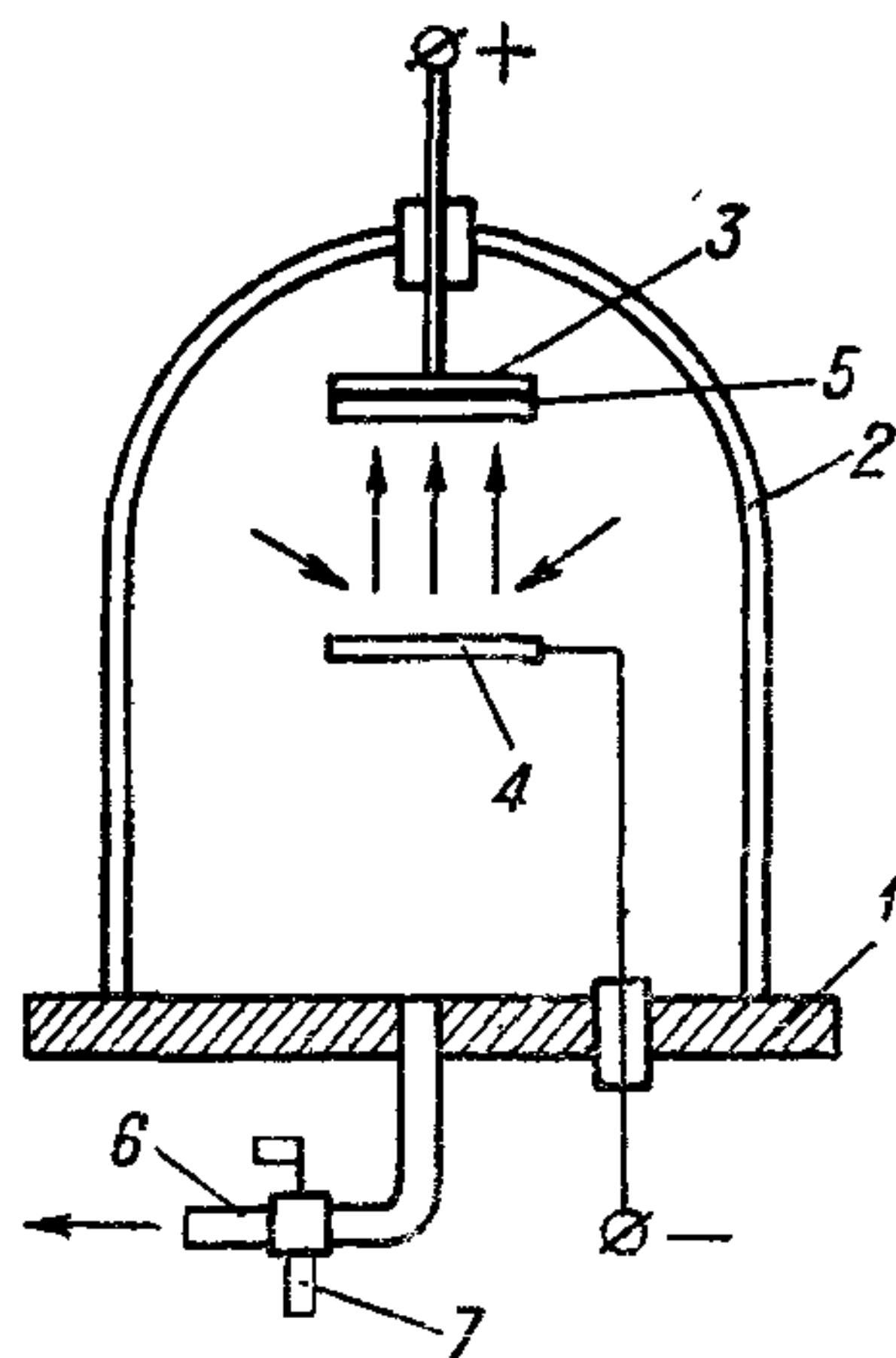


Рис. 44. Схема установки для катодного распыления.

1 — основная плита; 2 — вакуумный колпак; 3 — анод; 4 — катод; 5 — подложка; 6 — труба к вакуум-наосу; 7 — кран.

§ 23. Особенности обкладок, нанесенных металлизацией

При замене обкладок из фольги тонким слоем металла, нанесенным тем или иным методом на поверхность диэлектрика, в конденсаторе могут возникать некоторые явления, которые не наблюдались при обкладках из металлической фольги. К числу этих явлений следует в первую очередь отнести: а) явление мерцания емкости и б) явление самовосстановления конденсатора при пробое.

Явление мерцания емкости было обнаружено для керамических и слюдяных конденсаторов с серебряными обкладками как нанесенными методом вжигания, так и испарением

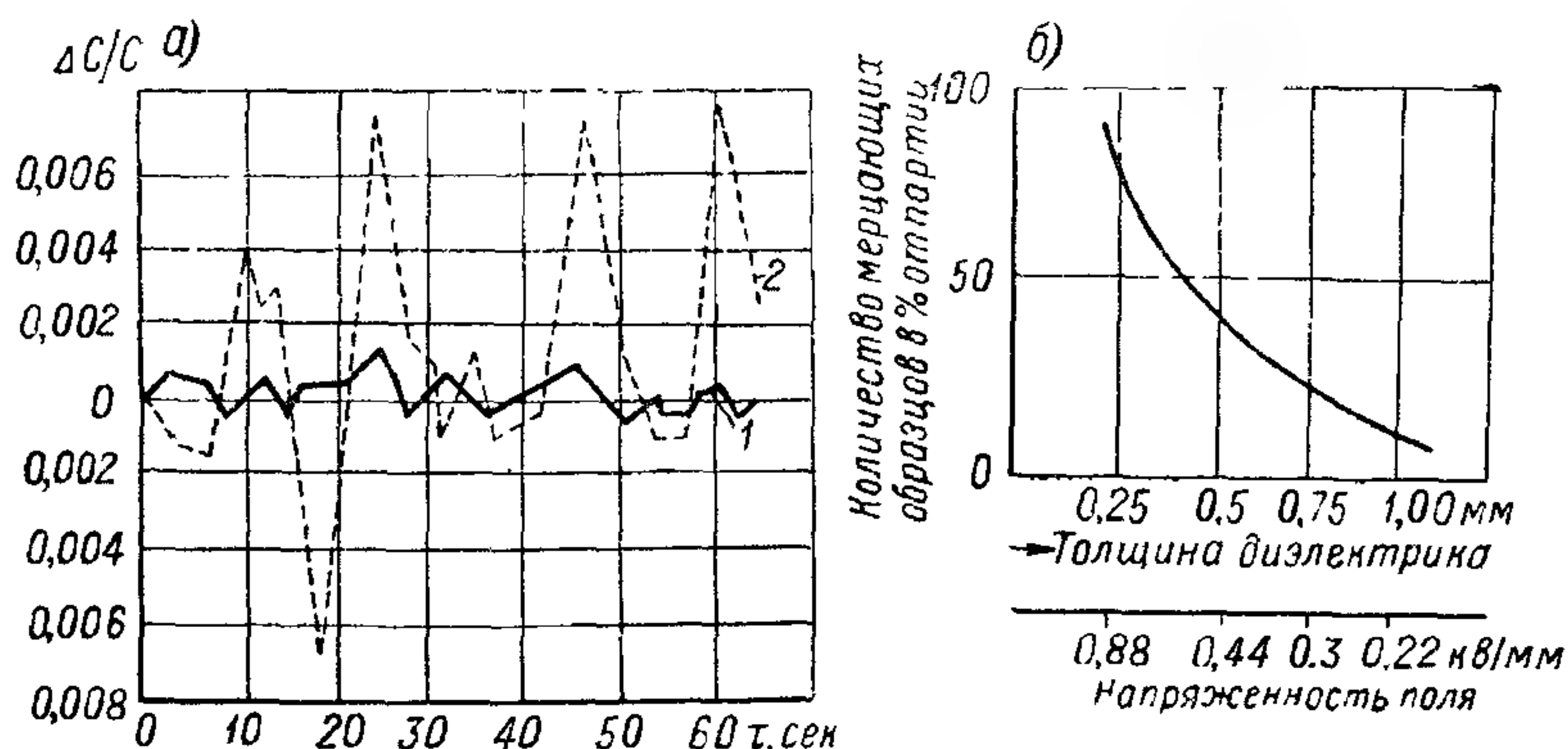


Рис. 45. «Мерцание» емкости керамического конденсатора: а — колебания емкости при воздействии высокочастотного напряжения.

1 — напряжение 20 в; 2 — напряжение 90 в;

б — зависимость брака по «мерцанию» от толщины диэлектрика.

в вакууме. Это явление характеризуется небольшими самопроизвольными скачками емкости, вызывающими соответствующие скачки частоты контуров, в которых используются конденсаторы с таким дефектом. Величина таких скачков невелика, как показано на рис. 45, а, но возрастает с увеличением напряжения и может достигать значения порядка 0,001—0,01%, что уже может отражаться на стабильности работы особо точной и ответственной электронной аппаратуры. В связи с этим была разработана специальная методика для отбраковки конденсаторов, в которых наблюдалось это явление. Было установлено, что брак «по мерцанию» можно снизить, увеличивая толщину диэлектрика в конденсаторах, т. е. снижая рабочее значение напряженности поля (рис. 45, б).

Как показали проведенные исследования, явление мерцания связано с отсутствием четко выраженного края серебряного электрода и наличием большого числа мелких островков серебра, постепенно соединяющихся в сплошную обкладку по мере удаления от

закраин, свободных от серебра (рис. 46, а). Это явление особенно резко проявляется при неплотном прилегании рамки, прикрывающей края слюдяной пластинки в процессе вакуумного серебрения

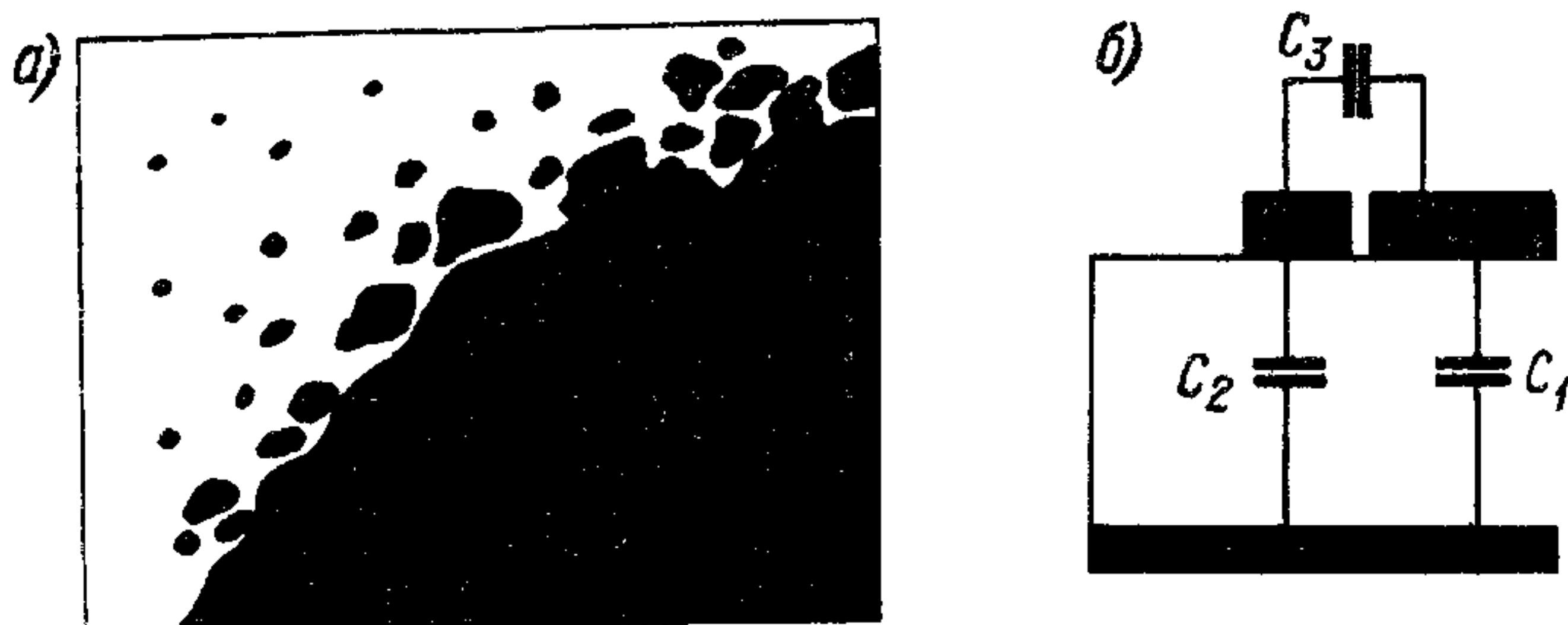


Рис. 46. Природа явления «мерцания»: а — край серебреного электрода на слюде с островками металла (увеличение 50 раз); б — схема включения частичных емкостей.

или при подчистке серебряного электрода (в процессе подгонки емкости) у керамических конденсаторов, посеребренных методом вжигания.

На рис. 46, б показана схема, эквивалентная мерцающему конденсатору; C_1 — основная емкость электрода (обкладки), C_2 — емкость «островок», C_3 — емкость тонкого зазора, отделяющего «островок» от основной обкладки. При высокой частоте по системе емкостей C_2 — C_3 проходит ток, создающий основное падение напряжения на емкости зазора, поскольку $C_3 \ll C_2$. При этом в зазоре возникает автоэлектронная эмиссия, приводящая к образованию микродуги, присоединяющей C_2 к C_1 , что дает скачкообразное увеличение емкости конденсатора. При обрыве дуги емкость, также скачкообразно, уменьшается. Ослабление мерцания при увеличении толщины диэлектрика связано с уменьшением емкости островков C_2 . Такой же эффект дает снижение ϵ диэлектрика. Погружение мерцающего конденсатора в жидкий диэлектрик не устраняет мерцания; увлажнение усиливает его.

Явление мерцания может приводить к небольшому возрастанию емкости серебряных конденсаторов с напряжением (рис. 47); этим возрастанием обычно можно пренебречь, за исключением случаев, когда точность емкости играет особую большую роль (образцовые конденсаторы). Возрастание емкости с напряжением наблюдалось

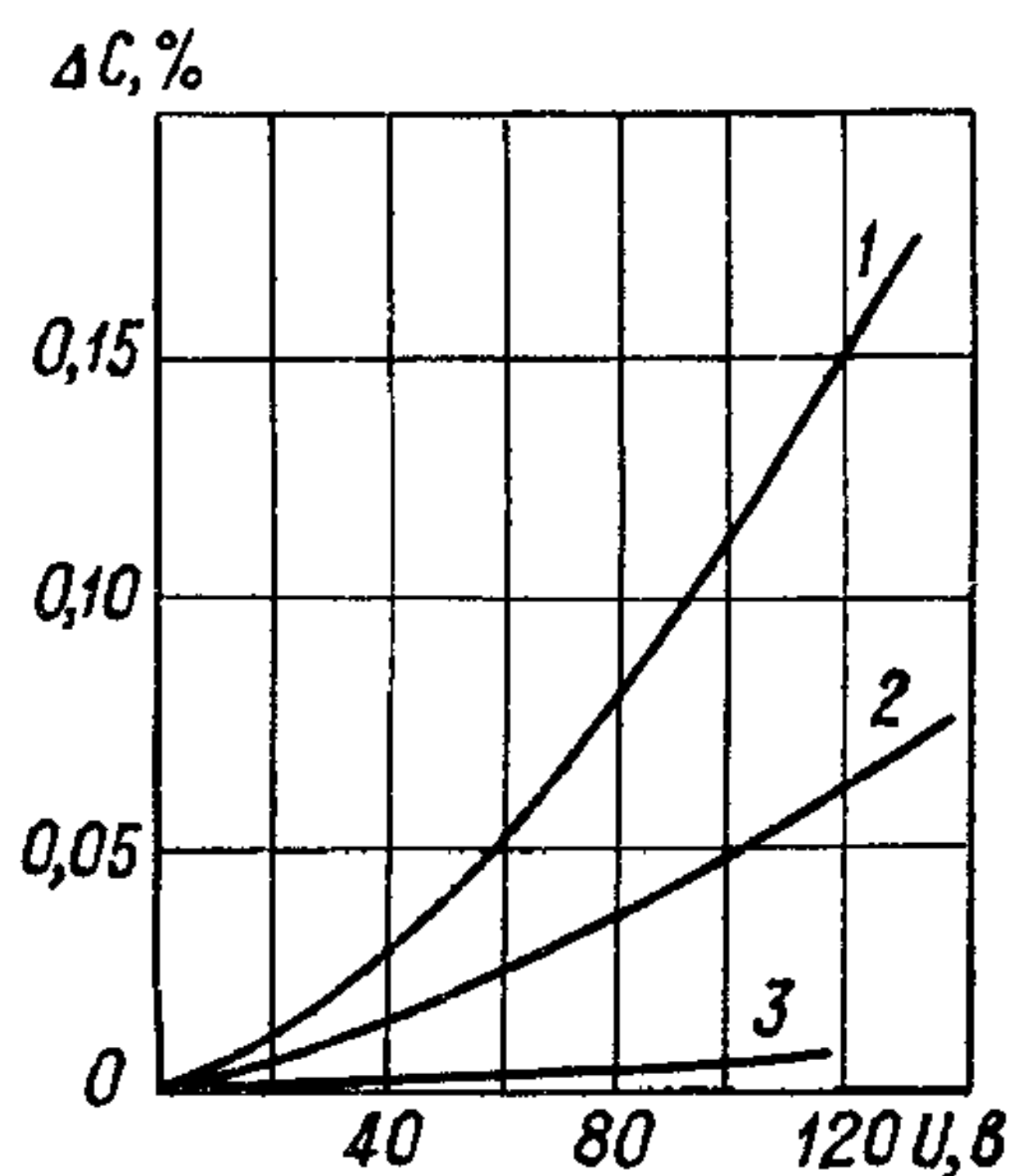


Рис. 47. Зависимость емкости слюдяных конденсаторов от напряжения при частоте 1 кГц.

1 — серебряный конденсатор;
2 — фольговый непросушенный;
3 — фольговый просушенный.

также и в случае слюдяных конденсаторов с обкладками из фольги при наличии влаги на закраинах (недостаточная просушка), но в этом случае природа возрастания емкости имеет уже другой характер (§ 42).

Явление мерцания связано не только с ухудшением стабильности емкости, но и с увеличением потерь энергии в конденсаторе.

Очевидно, что это явление не является специфическим для серебряных электродов, но может проявляться при металлизации диэлектрика и иными металлами.

Явление самовосстановления электрической прочности при пробое было обнаружено для металlobумажных и металлопленочных конденсаторов, имеющих значительно меньшую толщину металлического слоя в сравнении со слюдяными или, особенно, керамическими конденсаторами. При коротком замыкании тонких металлизированных обкладок в момент пробоя по обкладкам проходит ток короткого замыкания, плотность которого возрастает по мере приближения к точке, в которой произошел пробой. На участке наибольшей плотности тока вокруг места пробоя внутри окружности малого радиуса r выделяется достаточно тепла для расплавления (и, возможно, испарения) тонкого металлического слоя. При этом появляются условия для возникновения между об-

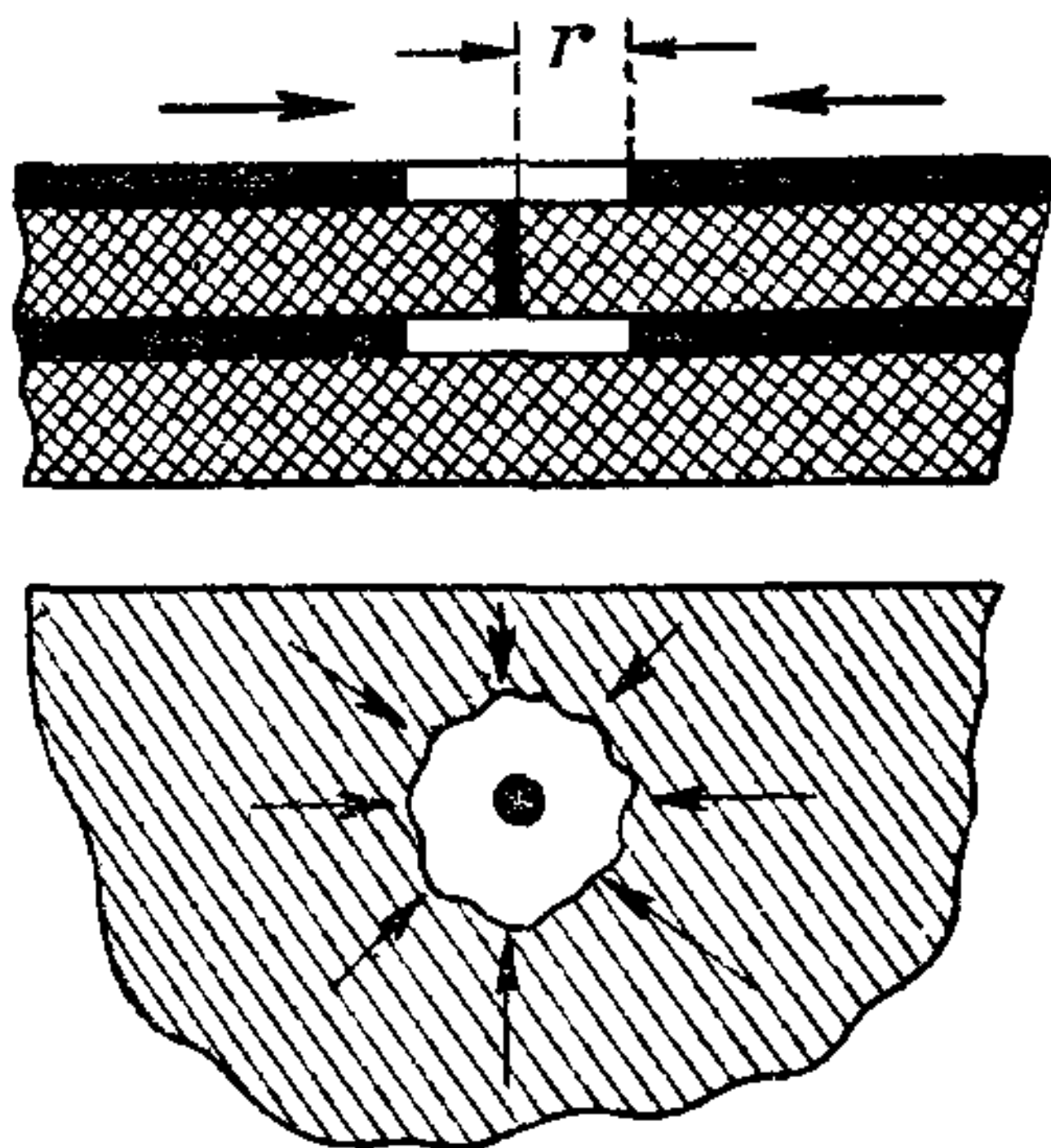


Рис. 48. Схема к рассмотрению процесса самовосстановления металлизированного конденсатора.

кладками электрической дуги, которая разбрасывает расплавленный металл, создавая вокруг места короткого замыкания участок поверхности, свободный от металлического слоя (рис. 48).

При увеличении радиуса изолированного участка дуга удлиняется, гаснет и процесс самовосстановления заканчивается.¹ Место короткого замыкания оказывается изолированным от обкладок. При этом величина r обычно лежит в пределах 0,1—1 мм.

Этот процесс происходит весьма быстро за 10^{-4} — 10^{-5} сек, так что напряжение металлизированного конденсатора, в котором произошел пробой, не успевает существенно снизиться. Для того, чтобы процесс восстановления происходил успешно и удаление металла осуществлялось лишь на небольшом участке обкладки вокруг места пробоя, необходимо, чтобы толщина слоя не была чрезмерно мала и чтобы слой был однородным по всей поверхности. Если слой слишком тонок и неоднороден, то распределение плотности тока короткого замыкания будет также неоднородным,

¹ Гашение дуги связано также с повышением давления газов, образующихся при частичном разложении диэлектрика от воздействия дуги.

и «выгоранию» обкладки будет происходить неравномерно, часто в удалении от места пробоя, обычно оставляя ветвистые следы разрушения на обкладке и на диэлектрике (рис. 49).

Для однослойных металлизированных конденсаторов с обкладками из цинка характерно постепенное снижение постоянной времени при длительном хранении без напряжения или в условиях эксплуатации при напряжениях много меньше номинального значения. В отдельных случаях может даже наблюдаться появление короткого замыкания между обкладками. Это явление связано с повышенной утечкой в местах самовосстановления при пробое, которая обусловлена тем, что на поверхности, лишенной металла, вокруг места пробоя могут оставаться следы окиси цинка, которая является полупроводником. Кроме того, на этой поверхности могут появиться проводящие пути за счет того, что атомы цинка, склонные к миграции, могут образовывать длинные тонкие кристаллы («усы»), прорастающие от края обкладки до точки короткого замыкания. Обкладки из алюминия лучше цинковых в том отношении, что окись алюминия является диэлектриком и что этот металл не образует «усов». Повышенная утечка может быть связана также с разрушением поверхности диэлектрика в месте самовосстановления.

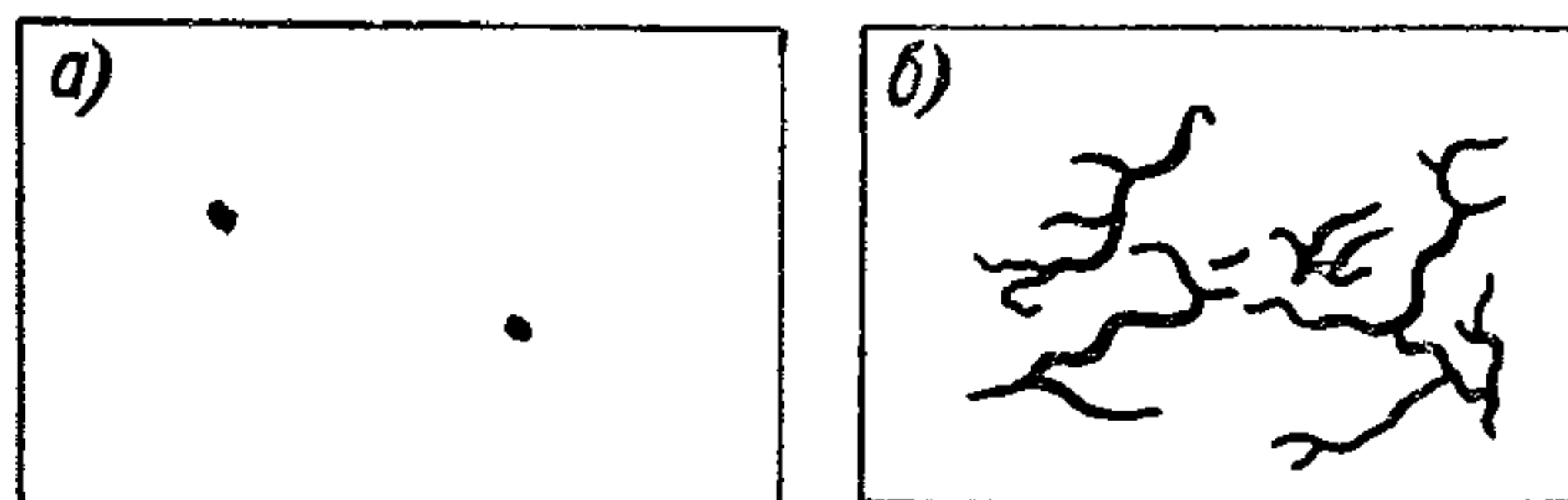


Рис. 49. Следы выжигания металлизированного слоя в местах пробоя (белый фон — обкладка, черные места — участки, с которых удален металл): а — однородный слой; б — неоднородный слой с неравномерно распределенной проводимостью.

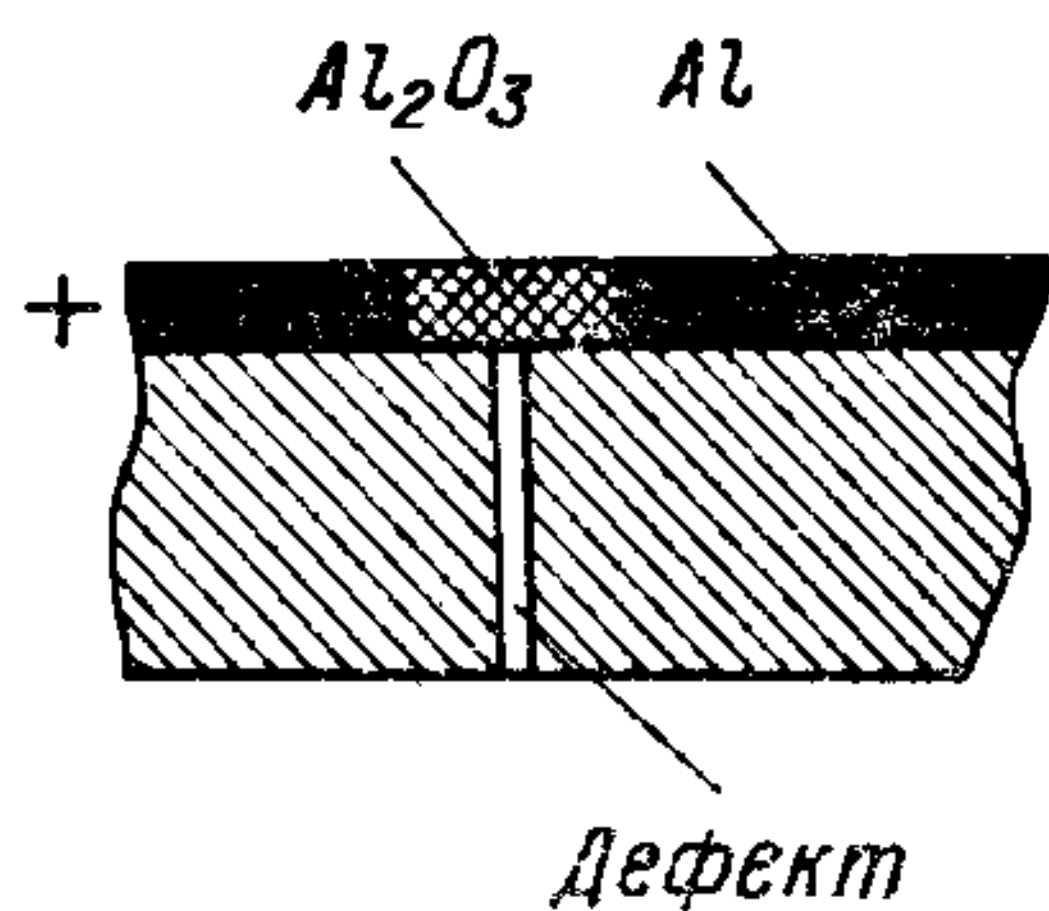


Рис. 50. Схема электрохимического самовосстановления металлизированного конденсатора.

При металлизации алюминием установлена также возможность самовосстановления конденсаторов с резко сниженной постоянной времени при воздействии низкого напряжения за счет явления электролитического окисления алюминиевой обкладки в месте дефекта диэлектрика, по которому проходит основной ток утечки (рис. 50). Этот механизм самовосстановления получил название электрохимического восстановления. Данный механизм не может проявиться при обкладках из цинка, так как при окислении последнего, как уже указывалось, образуется не диэлектрик, а полупроводник.

При внедрении металлизации диэлектрика в производство пленочных конденсаторов было установлено, что процесс самовосстановления в некоторых типах этих конденсаторов, например в полистирольных или поликарбонатных, происходит значительно хуже,

чем в металlobумажных конденсаторах. Количество повторных самовосстанавливающихся пробоев, которые конденсатор может выдержать, у них значительно меньше, чем в металlobумажных; иногда после первого пробоя самовосстановления вообще не происходит и устанавливается необратимое короткое замыкание обкладок.

Проведенные недавно исследования позволили прийти к выводу, что это явление тесно связано с составом пленочного диэлектрика и, в частности, с относительным содержанием кислорода в его молекуле. Ниже указан ряд диэлектриков, расположенных в порядке ухудшения способности к самовосстановлению изготовленных из них металлизированных конденсаторов. Для каждого из этих диэлектриков указан его состав (в виде формулы) и отношение числа атомов кислорода в молекуле к числу атомов углерода.

Наименование диэлектрика	Состав	Относительное содержание кислорода: O/C
Целлюлоза (бумага)	$(C_6H_{10}O_5)_n$	0,83
Триацетат целлюлозы	$(C_{12}H_{16}O_8)_n$	0,66
Полиэтилентерефталат	$(C_{10}H_8O_4)_n$	0,40
Поликарбонат	$(C_{16}H_{14}O_3)_n$	0,19
Полистирол	$(C_8H_8)_n$	0

По мере ухудшения способности к самовосстановлению при пробое заметно снижается относительное содержание кислорода в молекуле диэлектрика. При этом в продуктах разложения, образующихся при частичном разрушении поверхности диэлектрика электрической дугой в процессе деметаллизации участка вокруг места пробоя, появляется свободный углерод, частицы которого осаждаются на поверхности изолированного участка, создавая пути утечки от места пробоя к обкладке. При достаточном содержании кислорода в молекуле освобождающийся углерод окисляется и выделяется в виде окиси углерода, т. е. в газообразной форме. Среди указанных выше диэлектриков наихудшую способность к самовосстановлению имеет полистирол, представляющий собой чисто углеводородное соединение. В связи с этим в тех условиях, когда металlobумажные конденсаторы выдерживают несколько десятков тысяч пробоев, заканчивающихся самовосстановлением, металлизированные полистирольные конденсаторы выдерживают лишь десятки или даже единицы пробоев, после чего обкладки окончательно замыкаются «накоротко». Недостаточно удовлетворительной способностью к самовосстановлению должны также обладать поликарбонатные конденсаторы, в диэлектрике которых содержание кислорода невелико. Металлизированные полиэтилентерефталатные и триацетатные конденсаторы уже близки к металlobумажным.

ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В КОНДЕНСАТОРЕ

§ 24. Общие сведения о потерях энергии

Всякий реальный конденсатор, включенный в электрическую цепь, рассеивает электрическую энергию. Эта энергия является потерянной, так как расходуется на вредный нагрев конденсатора и уходит в окружающую среду. Потери энергии в конденсаторе, в общем случае, складываются из следующих основных составляющих:

1. Потери энергии в диэлектрике конденсатора P_d :

а) от движения ионов (проводимость, междуслойная поляризация, ионно-релаксационная поляризация);

б) от вращения дипольных молекул и перемещения полярных групп (дипольная, дипольно-радикальная, спонтанная поляризация);

в) от ионизации воздушных включений в диэлектрике или воздуха у края обкладок.

Кроме потерь в основном диэлектрике конденсатора, приходится учитывать и потери энергии во вспомогательных диэлектриках, использованных в конструкции конденсатора (заливочная масса, изоляция от корпуса, пластмассовая опрессовка, выводные изоляторы), поскольку эти диэлектрики попадают в электрическое поле рассеяния, образуя паразитную емкость.

2. Потери энергии в металлических (проводящих) частях конденсатора P_m :

а) от нагрева током контактов и выводов;

б) от нагрева током обкладок;

в) от явления мерцания у краев обкладок, полученных металлизацией диэлектрика;

г) от вибрации обкладок.

Полные потери энергии в конденсаторе в единицу времени — активная мощность (§ 18, формула 77) — складываются из этих двух составляющих:

$$P_A = P_d + P_m. \quad (86)$$

Величина потерь опасна прежде всего потому, что выделяемое в конденсаторе тепло может привести к недопустимому повышению температуры конденсатора. При установившемся тепловом состоянии конденсатора количество тепла, выделяющееся в нем за 1 сек, характеризуемое величиной P_A , должно быть равно количеству тепла, отводимому в 1 сек с его поверхности в окружающую среду:

$$P_A = \alpha_T S (t_K - t_0), \quad (87)$$

где α_T — коэффициент теплоотдачи в $вт/см^2 \cdot град$; S — поверхность охлаждения конденсатора в $см^2$; t_0 — температура

окружающей среды, t_k — температура на поверхности конденсатора в °С.

Превышение температуры конденсатора над температурой окружающей среды (перегрев на поверхности конденсатора) оказывается прямо пропорциональным величине потерь P_A :

$$\Delta t_k = t_k - t_0 = \frac{P_A}{\alpha_T S}. \quad (88)$$

При использовании конденсаторных батарей большой реактивной мощности величина потерь может играть роль в экономическом отношении, так как приходится учитывать стоимость потерянной энергии. Например, в установке продольной компенсации на линии Куйбышев — Москва реактивной мощностью 500 000 *квар*, суммарные потери в конденсаторах составляют около 1500 *квт*, что представляет собой, по абсолютному значению, достаточно большую величину.

В колебательных контурах радиоприемной аппаратуры потери в конденсаторах малы по абсолютной величине и не опасны ни с точки зрения нагрева конденсатора, ни с точки зрения экономики. Однако и в этом случае приходится уделять им внимание в связи с тем, что наличие в конденсаторе активного сопротивления, определяемого потерями, может неблагоприятно влиять на работу контура, увеличивая его затухание и снижая частоту колебаний (см. § 15).

§ 25. Расчет величины потерь в конденсаторе при синусоидальном напряжении

Потери энергии в основном диэлектрике конденсатора (активная мощность, расходуемая в диэлектрике) могут быть подсчитаны по формуле

$$P_{д1} = 2\pi U^2 f C \operatorname{tg} \delta_d \text{ [вт]}, \quad (89)$$

где U — напряжение, приложенное к конденсатору (эфф.), в *в*; f — частота в *гц*; C — емкость конденсатора в *ф* и $\operatorname{tg} \delta_d$ — тангенс угла потерь основного диэлектрика.

Мощность $P_{д2}$, теряемая во вспомогательном диэлектрике, может быть рассчитана по формуле (89), если в нее подставить значение паразитной емкости C_n и величину тангенса угла потерь вспомогательного диэлектрика $\operatorname{tg} \delta_n$. Если в конструкции использовано несколько вспомогательных диэлектриков, то для каждого из них надо брать значение созданной им части общей паразитной емкости и соответствующее ему значение тангенса угла потерь. Тогда общие диэлектрические потери конденсатора

$$P_d = P_{д1} + \sum P_{д2} = 2\pi U^2 f \left(C \operatorname{tg} \delta_d + \sum_{i=1}^{i=n} C_{ni} \operatorname{tg} \delta_{ni} \right). \quad (90)$$

Выражение (90) показывает, что для снижения потерь в конденсаторах (что особенно важно при их использовании в высокочастотной технике) надо выбирать основной диэлектрик с минимальным углом потерь, а также требовать малого угла потерь и от вспомогательных диэлектриков. Следует также добиваться максимального снижения паразитной емкости в конструкции конденсатора, особенно если она создается вспомогательными материалами, имеющими повышенный угол потерь.

Кроме того, надо тщательно освобождать конденсатор от остатков воздуха, чтобы устранить потери от ионизации воздушных включений внутри диэлектрика, а также принимать специальные меры для устранения ионизации у края обкладок.

Для подсчета мощности, теряемой на нагрев металлических выводов конденсатора, можно использовать простейшую формулу

$$P_{м1} = r_{в} I^2, \quad (91)$$

где I — ток, потребляемый конденсатором, вычисляемый по формуле (68) или (74) и выраженный в a , и $r_{в}$ — сопротивление выводов.

При повышенных частотах приходится учитывать явление поверхностного эффекта («скин-эффект»), которое вызывает увеличение сопротивления металлических проводников по сравнению с его значением, измеренным при постоянном токе.

В этом случае при определении сопротивления выводов конденсатора, представляющих собой проводники круглого сечения диаметром d [см], можно пользоваться формулой

$$r_{в} = \frac{4}{\pi} \cdot 10^{-6} \frac{\rho l}{d^2} \cdot F(\alpha), \quad (92)$$

где l — суммарная длина обоих выводов в см; ρ — удельное сопротивление проводника в $мком \cdot см$ (табл. 1) и $F(\alpha)$ — коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления провода за счет поверхностного эффекта.

Аргумент α , определяющий значение $F(\alpha)$ для немагнитных материалов, может быть вычислен по формуле

$$\alpha = 0,1407d \sqrt{\frac{f}{\rho}} = kd \sqrt{f}. \quad (93)$$

где d — диаметр провода в см; f — частота в $гц$ и ρ — удельное сопротивление проводника в $мком \cdot см$.

Для меди $k = 0,106$; для алюминия $0,0843$; для серебра $0,111$.

При $\alpha < 0,5$ величина $F(\alpha) \approx 1$; при $0,5 < \alpha < 3$ величину $F(\alpha)$ можно найти по графику на рис. 51; при $\alpha > 3$ значение $F(\alpha)$ можно найти по приближенной формуле

$$F(\alpha) \approx \frac{\sqrt{2} \alpha + 1}{4}. \quad (94)$$

Обкладки конденсаторов обычно имеют небольшую толщину и в них явление поверхностного эффекта может сказываться только при весьма высоких частотах, порядка 100 Мгц и выше.

При вычислении мощности, теряемой на нагрев обкладок конденсатора, надо учесть изменение тока по длине обкладки. Рассмотрим простейший плоский конденсатор с выводами в конце каждой обкладки (рис. 52). Обозначим длину обкладки l , ширину b , толщину $\delta_{об}$ (в см), удельное сопротивление металла обкладки ρ (в ом·см). В том конце обкладки, где поставлен вывод, ток равен I [а]; далее ток линейно спадает по длине,

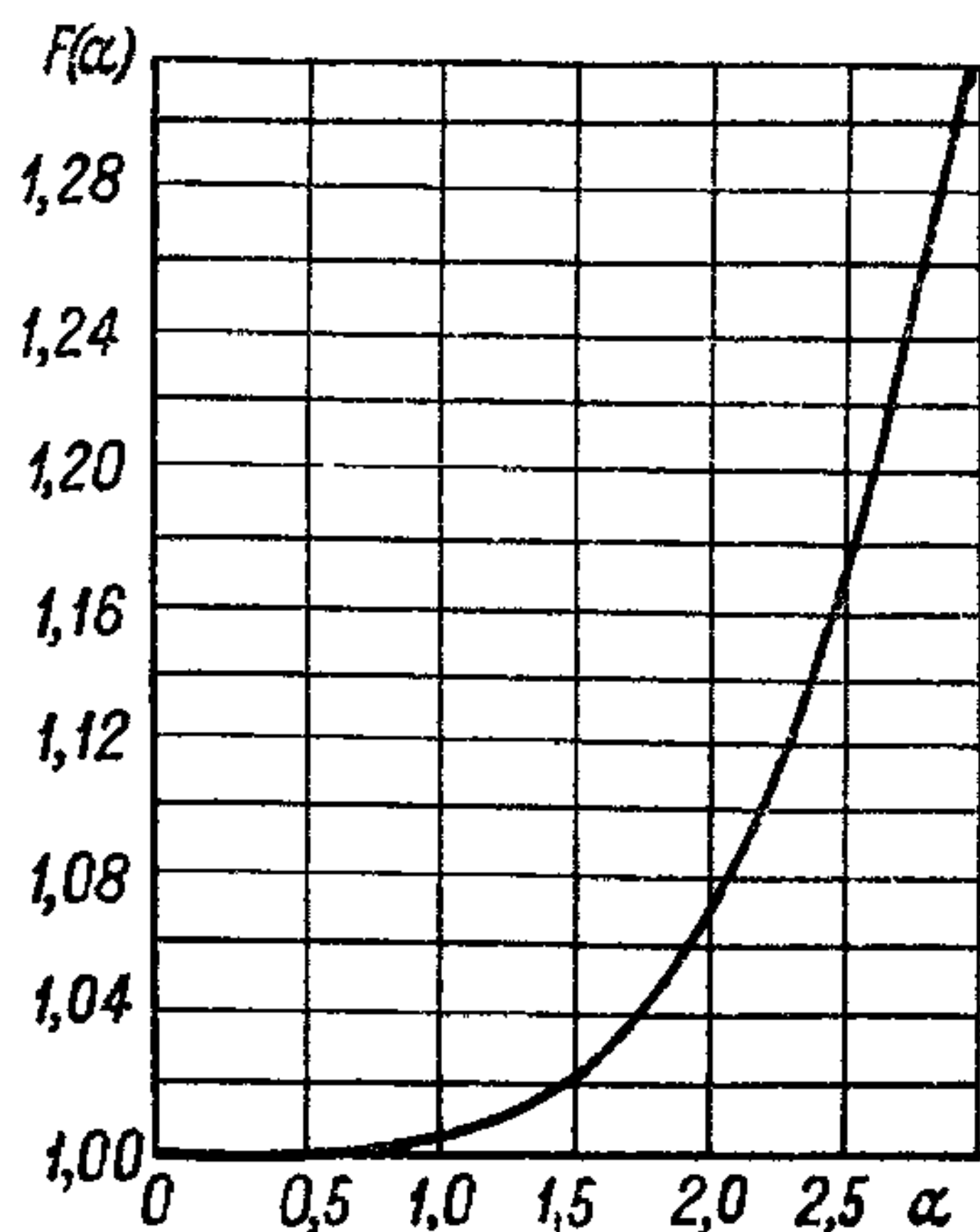


Рис. 51. Кривая к расчету сопротивления проводника с учетом поверхностного эффекта.

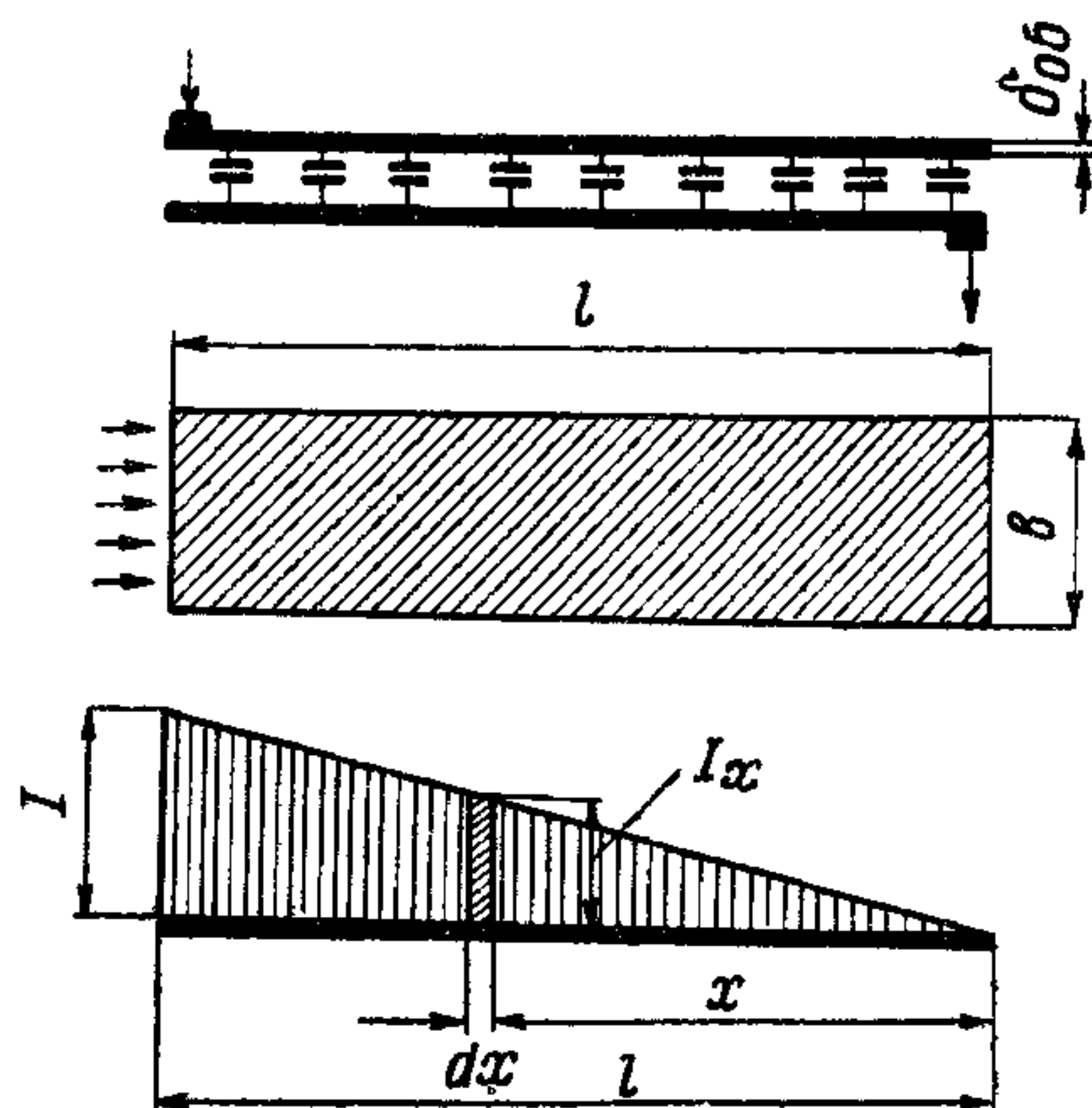


Рис. 52. Схема к расчету мощности, теряемой в обкладках.

обкладки и в противоположном ее конце равен нулю. Выделим элемент обкладки длиной dx на расстоянии x от того конца обкладки, где ток равен нулю. Сопротивление этого элемента будет равно:

$$r_x = \rho \frac{dx}{b\delta_{об}}.$$

Ток в этом элементе имеет величину $I_x = I \frac{x}{l}$; расход мощности на нагрев элемента составляет

$$P_x = r_x I_x^2 = \frac{\rho I^2}{l^2 b \delta_{об}} \cdot x^2 dx.$$

Для того чтобы получить величину мощности, теряемую во всей обкладке, надо проинтегрировать это выражение по длине обкладки. В двух обкладках потерянная мощность, очевидно, в 2 раза

больше, в связи с этим для мощности, расходуемой на нагрев обкладок плоского конденсатора, получаем:

$$P_{м2} = 2 \int_0^l P_x = \frac{2\rho I^2}{l^2 b \delta_{об}} \cdot \int_0^l x^2 dx = \frac{2}{3} \frac{\rho l}{b \delta_{об}} \cdot \rho I^2. \quad (95)$$

Если учесть часть длины обкладки Δl , выступающую за пределы активной площади (над закраиной на противоположной стороне диэлектрика и в месте соединения с выводом) и понимать под значением l только активную длину обкладки (определяющую площадь перекрытия обкладок), то выражение (95) принимает вид:

$$P_{м2} = 2 \cdot \frac{\left(\Delta l + \frac{l}{3}\right)}{b \delta_{об}} \rho I^2. \quad (96)$$

Мощность, теряемую в обкладках цилиндрического конденсатора, можно найти по формуле (95), выразив ширину обкладки как среднюю длину окружности:

$$l = \pi D_{ср},$$

где $D_{ср}$ — среднее значение диаметра цилиндрического конденсатора.

Для плоского многопластинчатого конденсатора с числом обкладок N , пользуясь аналогичными рассуждениями, получаем:

$$P_{м2} = 2 \cdot \frac{(2N - 3) \left(\Delta l + \frac{l}{3}\right)}{(N - 1)^2 b \delta_{об}} \cdot \rho I^2. \quad (97)$$

Здесь, как и выше, все размеры в см, ρ — в ом·см и мощность в вт.

В случае намотанного спирального конденсатора со скрытой фольгой (см. выше § 17) при расположении выводов в конце (или начале) намотки для вычисления мощности, теряемой на нагрев обкладок, можно пользоваться формулой (95), понимая под величиной l длину ленты фольги (длину одной обкладки). Если выводы поставлены в середине намотки (рис. 53, а), то потери в обкладках снизятся в 4 раза и выразятся формулой

$$P_{м2} = \frac{l}{6b\delta_{об}} \rho I^2. \quad (98)$$

Иногда при большой длине ленты фольги (большая емкость) ставят несколько пар выводов. Если число пар выводов будет n

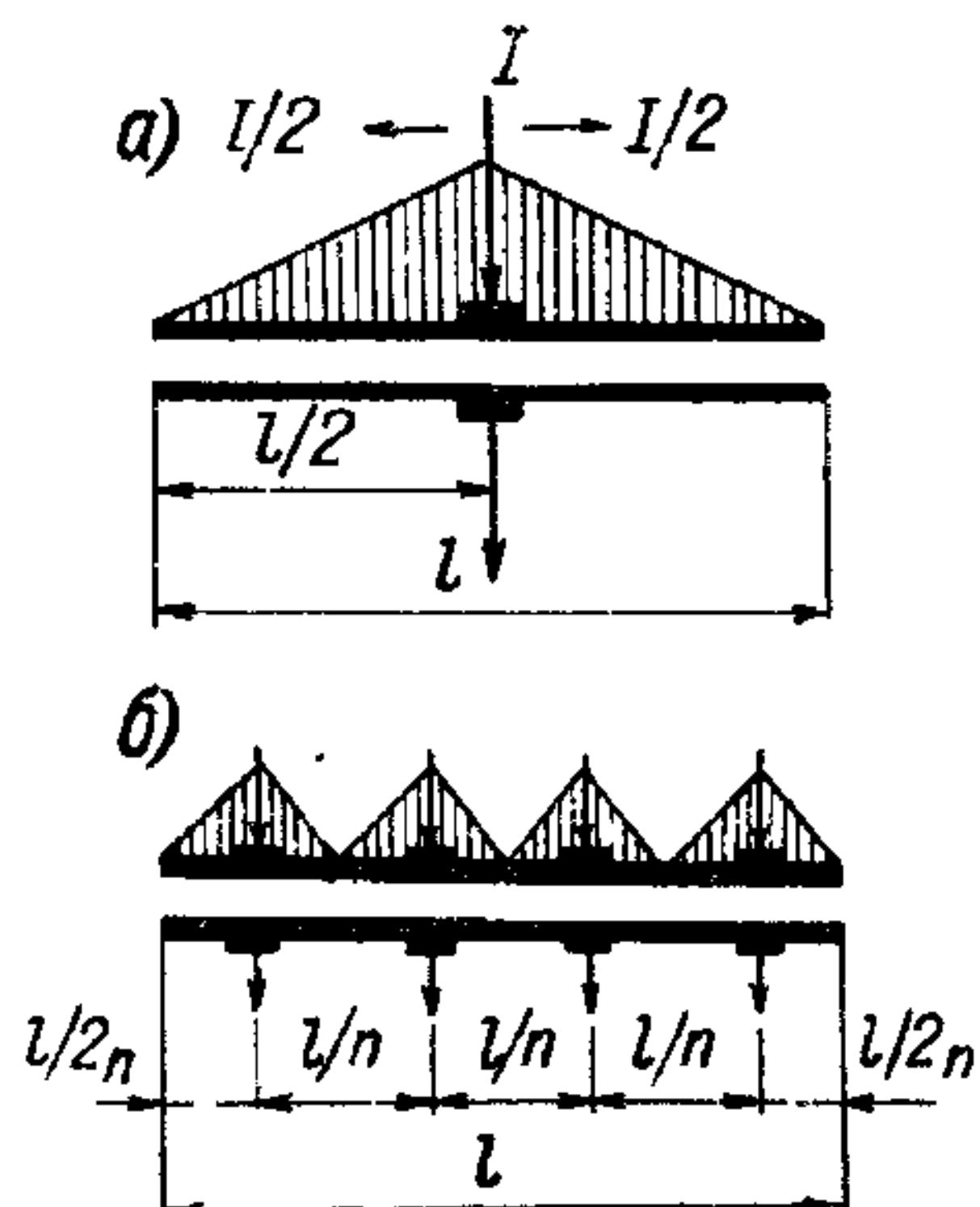
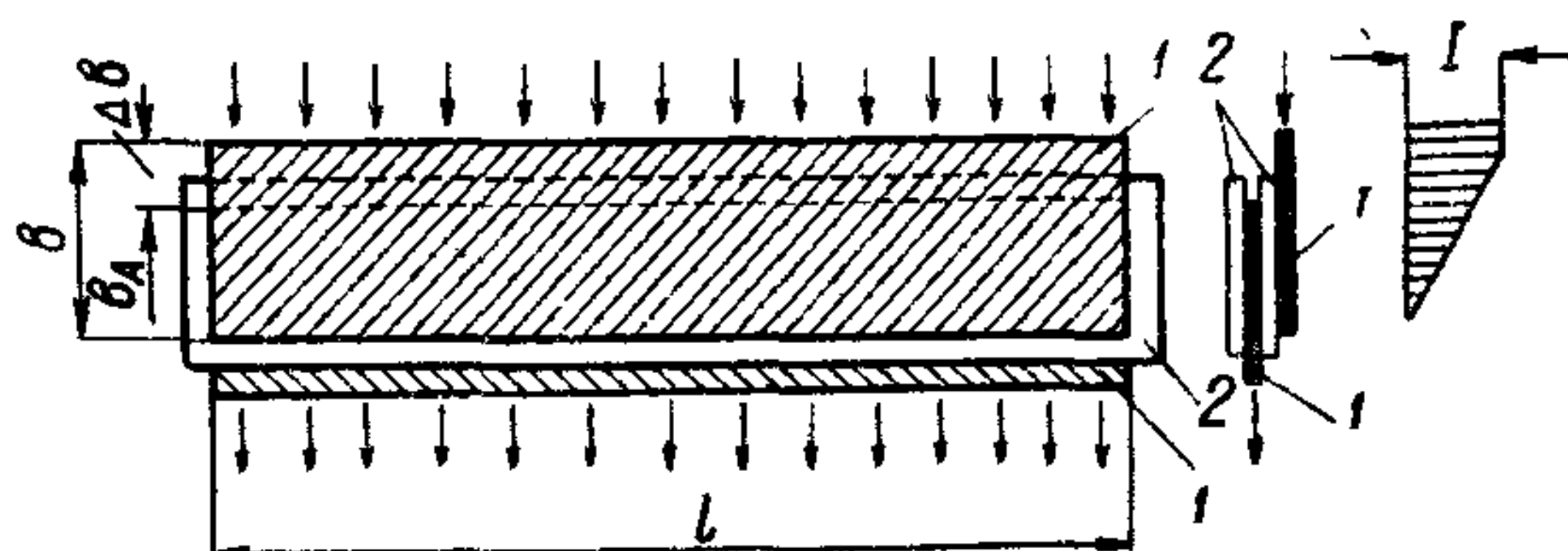


Рис. 53. Схема расположения выводов к расчету потерь в обкладках: а — одна пара выводов в середине длины обкладки; б — несколько пар выводов, симметрично расположенных по длине обкладки.

и они расположены равномерно по длине обкладки, как показан на рис. 53, б, то мощность, теряемая в обкладках, будет равна

$$P_{м2} = \frac{1}{6n^2} \frac{l}{b\delta_{об}} \cdot \rho I^2. \quad (99)$$

При намотке с выступающей фольгой («без индукционной», рис. 54) ток вводится с торцов конденсаторной секции; поэтому ширина фольги определяет длину пути тока, длина ленты — ширину пути тока. Если активная ширина фольги, определяющая перекрытие обкладок, будет b_a и $\Delta b = b - b_a$ — часть ширины фольги, определяемая закраиной и необходимостью осуществить соединение с выводом (здесь b — полная ширина ленты фольги), то мощность, теряемая в обкладках конденсатора с таким типом намотки будет равна:



$$P_{м2} = 2 \cdot \frac{\Delta b + \frac{b_a}{3}}{l\delta_{об}} \cdot \rho I^2. \quad (100)$$

Рис. 54. Схема к расчету потерь в обкладках при намотке с выступающей фольгой.

Если пренебречь величиной Δb в выражении (100) и сопоставит

его с выражением (95), которым можно пользоваться для конденсаторов с обычной намоткой (со скрытой фольгой), то можно легко найти, что отношение мощности, теряемой в обкладках при намотке со скрытой фольгой, к мощности, теряемой в обкладках при намотке с выступающей фольгой, определяется величиной $(l/b)^2$. Если длина обкладки 4 м, а ширина 4 см, то отношение $l/b = 100$. В этом случае переход от обычной намотки к намотке с выступающей фольгой дает уменьшение потерь в обкладках в 10 000 раз.

Таким образом, намотка с выступающей фольгой дает возможность изготовить намотанный конденсатор с резко сниженными потерями в обкладках, что особенно важно при изготовлении таких конденсаторов для работы при высоких частотах.

В случае металлизированных бумажных или пленочных конденсаторов контакт с обкладками осуществляется с торца секций (см. выше рис. 41); поэтому и можно рассматривать как конденсаторы с выступающими обкладками. Толщина слоя металла в таких конденсаторах мала и обычно точно неизвестна. Поэтому для них вместо величины удельного сопротивления металла обкладки лучше пользоваться сопротивлением металлического слоя $r_{сл}$ в ом, рассчитанным на единицу поверхности. Используя для металлизированных конденсаторов формулу (100), с учетом высказанных здесь соображений получаем.

$$P_{м2} = 2 \frac{\Delta b + \frac{b_a}{3}}{l} r_{сл} I^2. \quad (101)$$

здесь l — длина металлизированной ленты; b_a — активная ширина обкладки и Δb — закраина. Все размеры в см, $r_{сл}$ — в ом, P — мощность в вт.

Поскольку в данном случае длина пути тока определяется шириной, а не длиной обкладки, потери в металлизированной обкладке относительно невелики, несмотря на малую толщину слоя и повышенное в связи с этим сопротивление. Заметное возрастание потерь в металлизированных обкладках по сравнению с потерями в обкладках из фольги наблюдается только в области повышенных частот. Общие потери в металлических (проводящих) частях конденсатора определяются суммированием потерь в выводах, подсчитанных по формулам (91) или (92), и потерь в обкладках, найденных по одной из формул (95) — (101), соответствующей рассчитываемому типу конденсатора:

$$P_M = P_{M1} + P_{M2}.$$

Ток, потребляемый конденсатором, в первом приближении пропорционален частоте [формула (68)]; поэтому мощность, рассеиваемая в проводящих частях конденсатора (пропорциональная квадрату силы тока как для потерь в выводах, так и для потерь в обкладках) возрастает пропорционально квадрату частоты, и при высоких частотах становится основной составляющей потерь в конденсаторе. Во избежание чрезмерного перегрева высокочастотных конденсаторов для них обычно оговаривается верхний предел допускаемого тока при рабочих значениях частоты.

Использование вкладных контактов для соединения вывода с обкладкой может приводить к появлению значительного переходного сопротивления между обкладкой и выводом за счет окисления металла на контактной поверхности. Поэтому для снижения потерь в переходном контакте желательно непосредственно припаивать вывод к обкладке (или приваривать его).

Это необходимо также с точки зрения ослабления возможности возникновения шумов в аппаратуре, вызванных колебаниями сопротивления переходного контакта. В конденсаторе при малых напряжениях порядка 1 в и ниже вкладные контакты оказываются удовлетворительными также и потому, что тонкая оксидная пленка на контактирующих поверхностях может привести к электрическому отсоединению вывода от обкладки, т. е. к «потере мощности» (к «обрыву») (§ 17). Поэтому намотанные конденсаторы, предназначенные для работы при малых напряжениях, изготовляются с выступающей обкладкой. В и б р а ц и я о б к л а д о к под действием переменного электрического поля, вызывающего попеременное притяжение и отталкивание обкладок, может приводить к существенному возрастанию потерь энергии в конденсаторе, особенно при значительной величине напряжения повышенной частоты. Для устранения потерь на вибрацию в конденсаторах

с обкладками из фольги надо обеспечивать достаточно сильное сжатие конденсаторных секций в специальных обжимках (§ 21).

Явление мерцания, связанное с появлением микродуг между основной частью металлизированной обкладки и «островками» металла у ее краёв, может заметно увеличивать потери энергии в конденсаторах. Для снижения этих потерь надо обеспечивать возможно более ровные края обкладок при металлизации, устраняя рассеяние металла у краёв обкладки (§ 23).

Необходимо иметь в виду, что вычисление потерь в конденсаторе по приведенным здесь формулам дает лишь предварительные данные, которые нуждаются в уточнении (например, не учтены расчетом потери на вибрацию, мерцание и т. д.). Поэтому после изготовления опытных образцов конденсаторов, для расчета которых использовались данные о величине потерь, полученные вычислением, необходимо определить истинное значение потерь в образцах непосредственным измерением в рабочих условиях и внести в расчет соответствующие поправки.

§ 26. Угол потерь конденсатора

В идеальном конденсаторе активная мощность $P_A = UI \cos \varphi = 0$, так как $\varphi = 90^\circ$. В реальном конденсаторе $P_A \neq 0$ и, следовательно, $\cos \varphi \neq 0$ и $\varphi \neq 90^\circ$. Угол δ , дополняющий до 90° угол сдвига между векторами тока и напряжения в реальном кон-

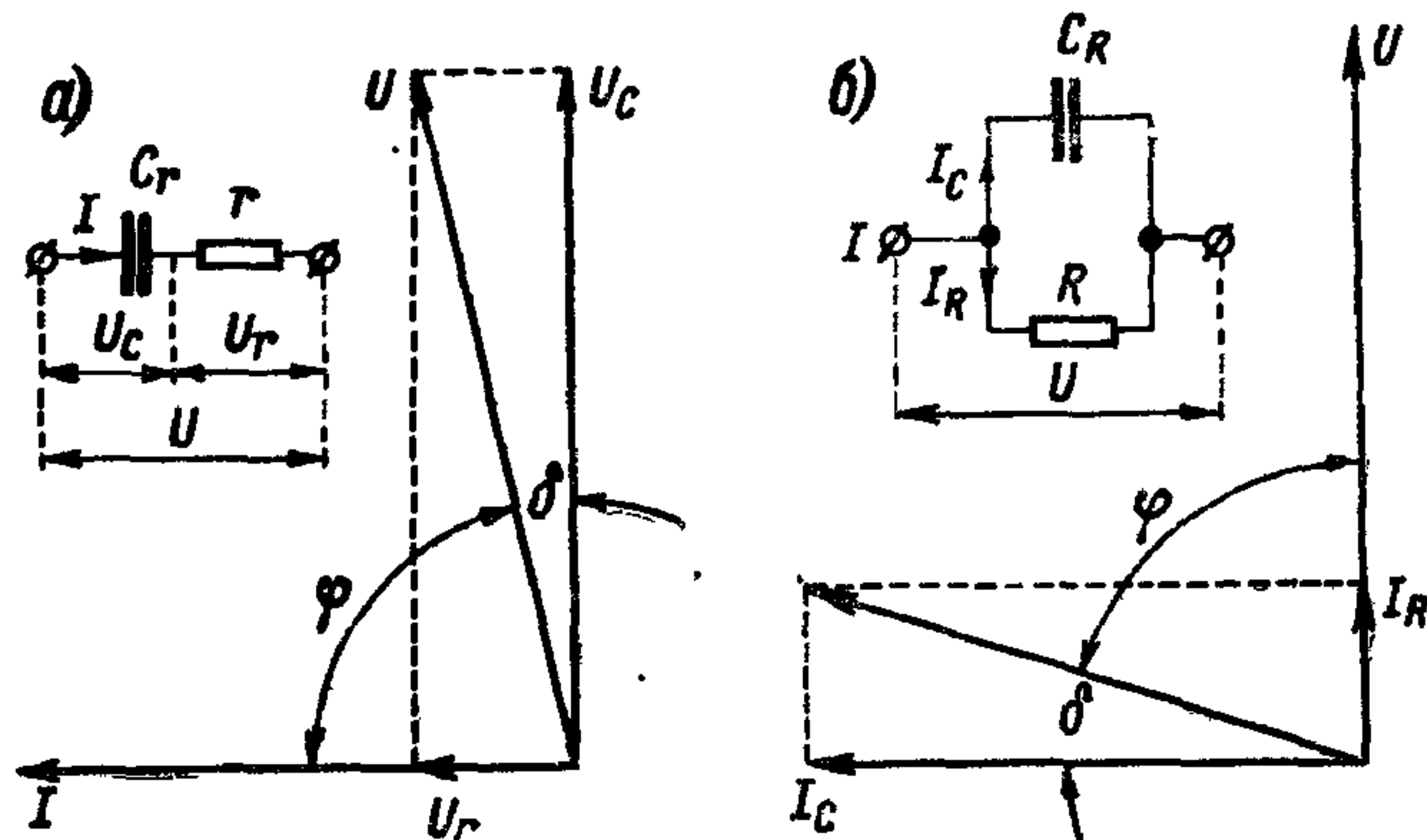


Рис. 55. Схемы, эквивалентные конденсатору с потерями: а — последовательная схема; б — параллельная схема.

денсаторе, носит название угла потерь конденсатора. Реальный конденсатор с потерями, обладающий активным сопротивлением, можно заменить эквивалентной схемой, последовательной (рис. 55, а) или параллельной (рис. 55, б).

Для последовательной схемы:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_r}{U_c} = \frac{I_r}{I_c} = r \omega C_r. \quad (102)$$

Для параллельной схемы:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R}{U\omega C_R} = \frac{1}{R\omega C_R}. \quad (103)$$

В формулах (102) и (103) величины r и R представляют собой значения сопротивления, эквивалентного потерям в конденсаторе, выраженные в ом; C_r и C_R — выражены в ф.

Величины r и R определяют собой активную мощность P_A , расходуемую в конденсаторе; при последовательной схеме $P_A = I^2 r$ и при параллельной схеме $P_A = \frac{U^2}{R}$.

Найдем связь между параметрами последовательной и параллельной схем, применив для этой цели символический метод. Напишем выражение для полного сопротивления при последовательной схеме и для полной проводимости при параллельной схеме:

$$z_r = r - j \frac{1}{\omega C_r}; \quad y_r = \frac{1}{R} + j\omega C_R.$$

Находим выражение для полного сопротивления при параллельной схеме:

$$z_R = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C_R} = \frac{\frac{1}{R} - j\omega C_R}{\frac{1}{R^2} + \omega^2 C_R^2} = \frac{R - jR^2\omega C_R}{1 + R^2\omega^2 C_R^2}.$$

Если параллельная и последовательная схемы изображают один и тот же конденсатор, то значения их полных сопротивлений z_r и z_R должны быть одинаковы как по величине, так и по фазе, т. е. мы можем приравнять соответственно как вещественные, так и мнимые части уравнений, изображающих z_r и z_R в символической форме.

Приравнивая вещественные части, имеем:

$$r = \frac{R}{1 + R^2\omega^2 C_R^2}.$$

Используя (103), получаем:

$$r = \frac{R}{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}}$$

или

$$R = r \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta} \right). \quad (104)$$

Приравнивая мнимые части, получаем:

$$\frac{1}{\omega C_r} = \frac{R^2\omega C_R}{1 + R^2\omega^2 C_R^2},$$

откуда

$$C_r = \frac{1 + R^2\omega^2 C_R^2}{R^2\omega^2 C_R}.$$

Умножая числитель и знаменатель на величину C_R и используя (103), имеем:

$$C_r = \frac{C_R (1 + R^2 \omega^2 C_R^2)}{R^2 \omega^2 C_R^2} = C_R \frac{\left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}\right)}{\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}} = C_R (1 + \operatorname{tg}^2 \delta),$$

или

$$C_R = \frac{C_r}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}. \quad (105)$$

Применяя формулы (104) и (105), мы можем производить пересчет от одной эквивалентной схемы, изображающей реальный конденсатор, к другой. Так, если нам известна емкость конденсатора и величина включенного с ней последовательно сопротивления обкладок и выводов, для расчета действующей емкости, определяющей собой ток, потребляемый конденсатором, мы можем воспользоваться формулой пересчета к параллельной схеме (105) и, используя выражение (102), получить формулу, учитывающую влияние сопротивления обкладок и выводов на величину действующей емкости:

$$C_d = \frac{C}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} = \frac{C}{1 + \omega^2 r^2 C^2}.$$

Эту формулу мы уже использовали в § 19, рассматривая зависимость емкости от частоты. Точно говоря, обе рассмотренные эквивалентные схемы (последовательная и параллельная) носят формальный характер в том отношении, что параметры r , R , C_r и C_R , определенные при некоторой данной частоте, не позволяют пользоваться формулами (102) и (103) для вычисления частотной зависимости угла потерь конденсатора, и для каждого нового значения частоты эти параметры надо определять заново. В то же время при заданном значении частоты, определив измерением r и C_r (или R и C_R) и пользуясь соответствующей формулой (102) или (103), мы находим для данной частоты правильное значение угла потерь, учитывающее как диэлектрические потери, так и потери в проводящих частях конденсатора.

В первом приближении можно считать, что последовательная схема ближе подходит к тому случаю, когда преобладают потери в обкладках и выводах, т. е. в металлических частях конденсатора, а параллельная схема — к случаю преобладания потерь в диэлектрике, в особенности потерь, вызванных проводимостью диэлектрика.

Для электролитических конденсаторов предложены более сложные эквивалентные схемы (§ 91).

Зная величину $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора, можно вычислить активную мощность, потребляемую последним:

$$P_A = UI \cos \varphi \approx U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = P_R \operatorname{tg} \delta, \quad (106)$$

где P_A — в *вт*, P_R — в *вар*, C — в *ф*.

Выражение (106) показывает, что при заданном значении $\operatorname{tg} \delta$ потери могут достигать особенно больших значений при высоких значениях рабочего напряжения U и при высокой рабочей частоте $\omega = 2\pi f$. Особенно трудным случаем является сочетание высоких значений U с высокими значениями f , что имеет место в контурных конденсаторах, применяемых в мощной радиопередающей аппаратуре и в электротермических высокочастотных устройствах, а также в некоторых типах импульсных конденсаторов, работающих в режиме большой частоты следования импульсов. Значительные потери энергии могут иметь место и при низкой частоте и относительно небольших напряжениях, если велика емкость конденсатора.

Используя выражения (88) и (106), находим, что величина перегрева на поверхности конденсатора прямо пропорциональна величине тангенса его угла потерь:

$$\Delta t_K = \frac{P_R}{\alpha_T S} = \frac{P_R}{\alpha_T S} \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (107)$$

Таким образом, снижение $\operatorname{tg} \delta$ за счет уменьшения потерь в диэлектрике и потерь в проводящих частях (например, за счет применения намотки с выступающими обкладками) позволяет соответственно снизить и перегрев конденсатора. При заданном значении $\operatorname{tg} \delta$ перегрев конденсатора можно снизить, увеличивая поверхность его охлаждения (например, путем приварки охлаждающих ребер) или увеличивая коэффициент теплоотдачи с поверхности корпуса α_T путем форсированного воздушного или водяного охлаждения (гл. VIII).

При заданных условиях охлаждения величина $\operatorname{tg} \delta$ определяет также максимальное значение реактивной мощности конденсатора $(P_R)_{\max}$, которое можно получить в единичном конденсаторе при заданном допустимом перегреве на его поверхности. Действительно, реактивная мощность пропорциональна кубу линейных размеров конденсатора a , так как определяет его объем V :

$$(P_R)_{\max} = k_1 V = k_1 a^3;$$

в то же время поверхность охлаждения пропорциональна квадрату линейных размеров конденсатора:

$$S = k_2 a^2.$$

Используя эти выражения, находим:

$$a = \sqrt[3]{\frac{(P_R)_{\max}}{k_1}} \quad \text{и} \quad S = k_2 \left(\sqrt[3]{\frac{(P_R)_{\max}}{k_1}} \right)^2.$$

Подставив значение S в формулу (107), получаем:

$$\Delta t_K = k_3 \frac{\operatorname{tg} \delta}{\alpha_T} \sqrt[3]{(P_R)_{\max}}, \quad (108)$$

где

$$k_3 = \frac{\sqrt[3]{k_1^2}}{k_2}.$$

Выражение (108) показывает, что снижение $\operatorname{tg} \delta$ в $\sqrt[3]{2}$, т. е. в 1,26 раза (примерно на 20%), дает возможность увеличить реактивную мощность в 2 раза, если ее величина определяется условиями нагрева.

У различных типов конденсаторов величина $\operatorname{tg} \delta$ может изменяться в широких пределах, как показывает табл. 2, в которой приведены современные нормы для этой характеристики.

Таблица 2

Нормы на величину $\operatorname{tg} \delta$ для различных типов конденсаторов

Тип конденсатора	Значение $\operatorname{tg} \delta$, $\times 10^4$ не более	Частота, гц
Воздушный образцовый	1	10^3
Вакуумный	3	10^6
Слюдяной опрессованный (выше 200 нф)	10	10^6
Полистирольный, фторопластовый	10	10^6
Керамический высокочастотный	12	10^6
Стеклоэмалевый	15	10^6
Бумажный силовой	30	50
Бумажный радиотехнический	100	10^3
Металлобумажный, лакопленочный	150	10^3
Керамический низкочастотный	400	10^3
Электролитический высоковольтный	1000	50
Электролитический низковольтный	2000	50

В радиотехнической практике для оценки качества конденсаторов иногда применяется величина, обратная $\operatorname{tg} \delta$, называемая добротностью:

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta}. \quad (109)$$

Иногда вместо $\operatorname{tg} \delta$ применяют также коэффициент мощности конденсатора $\cos \varphi$. При малых значениях угла потерь $\cos \varphi = \operatorname{tg} \delta$. При больших значениях δ надо производить пересчет по тригонометрическим формулам:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}$$

или

$$\cos \varphi = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}. \quad (110)$$

Величины $\operatorname{tg} \delta$ и $\cos \varphi$ иногда выражают в процентах. Реже качество конденсатора оценивается величиной удельных потерь, выражаемых в процентах или в вт/квар :

$$P_{A, \text{уд}} = \frac{P_A}{P_R}. \quad (111)$$

Поскольку реактивная мощность P_R мало отличается от кажущейся мощности P (§ 18), можно полагать $P_A, \text{ уд} \approx \cos \varphi$.

Потери в конденсаторе складываются из потерь в диэлектрике и потерь в металле, поэтому мы можем рассматривать две соответствующие составляющие тангенса угла потерь:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P_A}{P_R} = \frac{P_d + P_m}{P_R} = \frac{P_d}{P_R} + \frac{P_m}{P_R} = (\operatorname{tg} \delta)_d + (\operatorname{tg} \delta)_m \quad (112)$$

При низких частотах определяющей является составляющая $(\operatorname{tg} \delta)_d$, а при высоких частотах начинает играть большую роль и составляющая $(\operatorname{tg} \delta)_m$.

§ 27. Зависимость угла потерь конденсаторов от температуры и частоты

Основными внешними факторами, влияющими на угол потерь конденсатора, являются температура, частота и напряжение. При недостаточной влагозащите конденсатора влажность окружающей среды также влияет на величину его угла потерь, но этот вопрос будет рассмотрен ниже (гл. VII).

Х а р а к т е р т е м п е р а т у р н о й з а в и с и м о с т и у г л а п о т е р ь конденсатора определяется зависимостью угла потерь диэлектрика от температуры, поскольку потери в металлических частях мало изменяются с температурой. Зависимость угла потерь диэлектрика от температуры, а следовательно, и температурная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора имеет вид, показанный на рис. 56. Для не по л я р н ы х диэлектриков характерна кривая (а) (рис. 56, а), подъем которой в правой части рисунка обусловлен возрастанием потерь на проводимость, что присуще всем диэлектрикам.

Температура t_1 , при которой начинают увеличиваться потери, обусловленные проводимостью, будет тем выше, чем выше значение удельного сопротивления диэлектрика при нормальной температуре; поэтому вопрос о снижении потерь в конденсаторах при высоких рабочих температурах, особенно при их использовании в области низких частот, в значительной степени определяется возможностью получения диэлектриков с высоким удельным сопротивлением. Для по л я р н ы х диэлектриков, имеющих

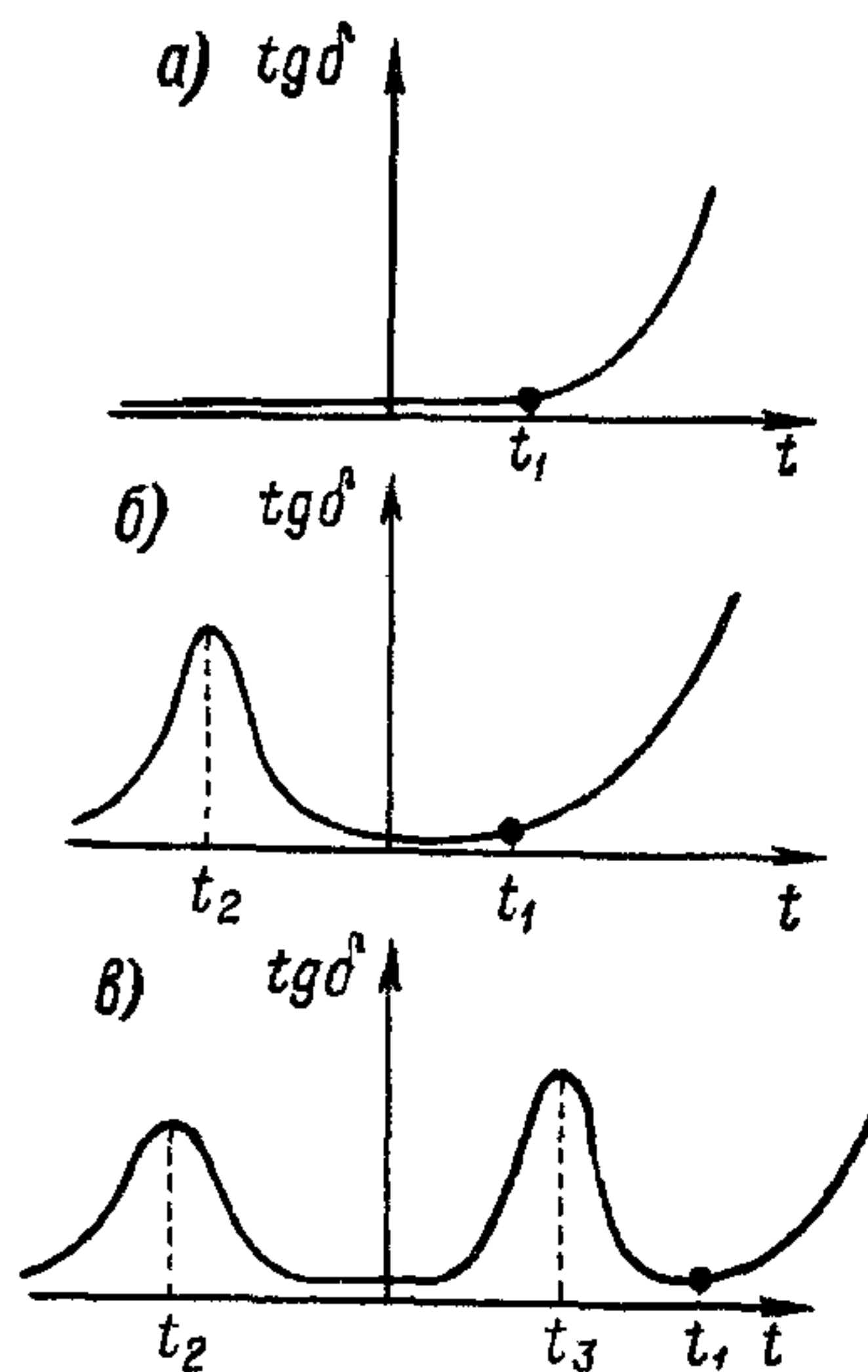


Рис. 56. Зависимость угла потерь диэлектрика от температуры: а — неполярный диэлектрик; б — полярный диэлектрик с дипольной поляризацией; в — высокомолекулярный полярный диэлектрик.

дипольную или дипольно-радикальную поляризацию (рис. 56, б), обычно в области температур ниже нуля появляется так называемый дипольный максимум $\operatorname{tg} \delta$, положение которого зависит от частоты и с повышением последней смещается в сторону более высоких температур. В случае полярных высокомолекулярных веществ (полимеров) могут иметь место даже два максимума: низкотемпературный при температуре t_2 , обусловленный движением полярных радикалов, и высокотемпературный при температуре t_1 , обусловленный релаксацией звеньев молекулы (рис. 56, в). Максимум на температурной зависимости $\operatorname{tg} \delta$ может также наблюдаться у диэлектриков с другими видами релаксационной поляризации: ионно-релаксационной и спонтанной.

В той области температур, где $\operatorname{tg} \delta$ проходит через максимум, наблюдается снижение ϵ диэлектрика при снижении температуры (рис. 7, ж), а следовательно, будет иметь место и соответствующее снижение емкости конденсатора. Смещению максимума $\operatorname{tg} \delta$ в сторону повышения температуры при повышении частоты будет соответствовать аналогичное смещение места перегиба кривой $\epsilon = f(t)$. Поэтому в конденсаторах с диэлектриком подобного типа снижение емкости при снижении температуры при высоких частотах может наблюдаться и в области положительных температур, а не только в области температур ниже нуля, как это обычно имеет место при низкой частоте. Поскольку потери, обусловленные проводимостью, присущи всем диэлектрикам как полярным, так и неполярным, нагрев всякого конденсатора в конечном счете при достаточно высокой температуре всегда должен привести к возрастанию его угла потерь с температурой, характеризующемуся правой ветвью на каждой из позиций рис. 56.

В некоторых случаях, когда угол потерь диэлектрика мало зависит от температуры, можно заметить возрастание угла потерь конденсатора с температурой и за счет роста составляющей, обусловленной потерями в металлических частях конденсатора. Как известно, удельное сопротивление металлов возрастает с температурой, причем эту зависимость в первом приближении можно выразить формулой

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \alpha_p (t_2 - t_1)], \quad (113)$$

где ρ_1 и ρ_2 — значения удельного сопротивления металла соответственно при значениях температуры t_1 и t_2 , а α_p — температурный коэффициент сопротивления металла. Для большинства чистых металлов величина α_p составляет около $0,004 \text{ град}^{-1}$ (см. табл. 1).

Таким образом, при повышении температуры на 100°C величина составляющей угла потерь конденсатора, обусловленной потерями в металлических частях, может возрасти примерно на 40%. Обычно возрастание потерь такого порядка мало заметно на фоне возрастания потерь в диэлектрике.

В электролитических конденсаторах роль одной из обкладок выполняет слой электролита, имеющий большое сопротивление, что заметно отражается на величине $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора. В отличие от металлов электролиты снижают свое удельное сопротивление с ростом температуры. Это приводит к снижению угла потерь таких конденсаторов при повышении температуры, особенно заметному в области температур ниже нуля (гл. XIII).

Х а р а к т е р ч а с т о т н о й з а в и с и м о с т и у г л а п о т е р ь конденсаторов определяется как характером частотной зависимости составляющей тангенса угла потерь конденсатора, обусловленной потерями в диэлектрике $(\operatorname{tg} \delta)_d$, так и зависимостью от частоты составляющей, обусловленной потерями в металличе-

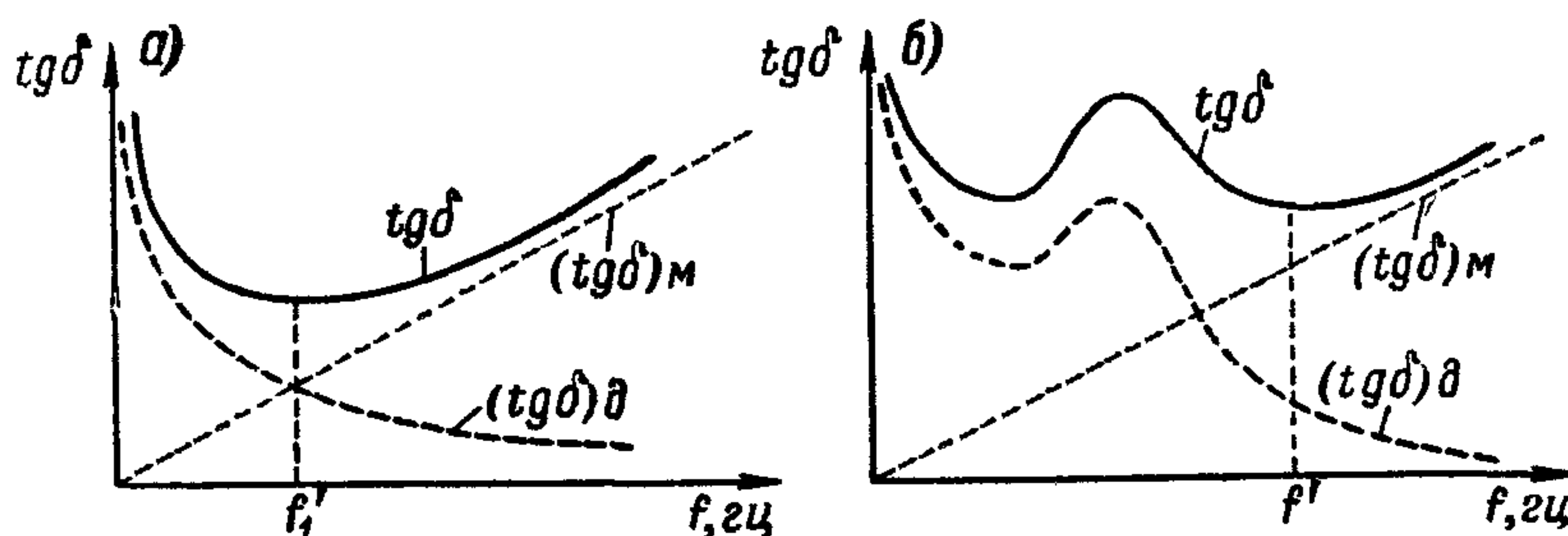


Рис. 57. Зависимость угла потерь конденсатора от частоты: а — конденсатор с неполярным диэлектриком; б — конденсатор с полярным диэлектриком.

ских частях $(\operatorname{tg} \delta)_m$, точнее потерями в проводящих частях, поскольку в качестве обкладки может быть использован не только металл, но также и электролит или полупроводник.

При повышении частоты составляющая $(\operatorname{tg} \delta)_d$ в случае неполярных диэлектриков, когда потери обусловлены только проводимостью диэлектрика, должна снижаться с ростом частоты, так как в этом случае сопротивление, эквивалентное потерям, следует представить в качестве параллельно включенного сопротивления и для выражения частотной зависимости $(\operatorname{tg} \delta)_d$ пользоваться формулой (103). В полярных диэлектриках и диэлектриках с ионно-релаксационной поляризацией в известном интервале частот может наблюдаться частотный максимум угла потерь, причем значение частоты, соответствующее этому максимуму, зависит от температуры и при повышении последней увеличивается.

Составляющая тангенса угла потерь конденсатора $(\operatorname{tg} \delta)_m$, обусловленная потерями в металлических (проводящих) частях, увеличивается с ростом частоты, так как сопротивление, эквивалентное этим потерям, следует представлять в качестве последовательного сопротивления и для выражения частотной зависимости $(\operatorname{tg} \delta)_m$ пользоваться формулой (102). Общий характер зависимости $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора от частоты, приведенный на рис. 57, показывает, что на частотной зависимости при некотором значе-

нии частоты f' должен иметь место минимум. Представим себе конденсатор в виде эквивалентной схемы рис. 58, а, где r — сопротивление, эквивалентное потерям в металлических (проводящих) частях, а R — потерям в диэлектрике. Для вычисления угла потерь конденсатора произведем пересчет параллельного участка этой схемы к последовательной схеме, показанной на рис. 58, б.

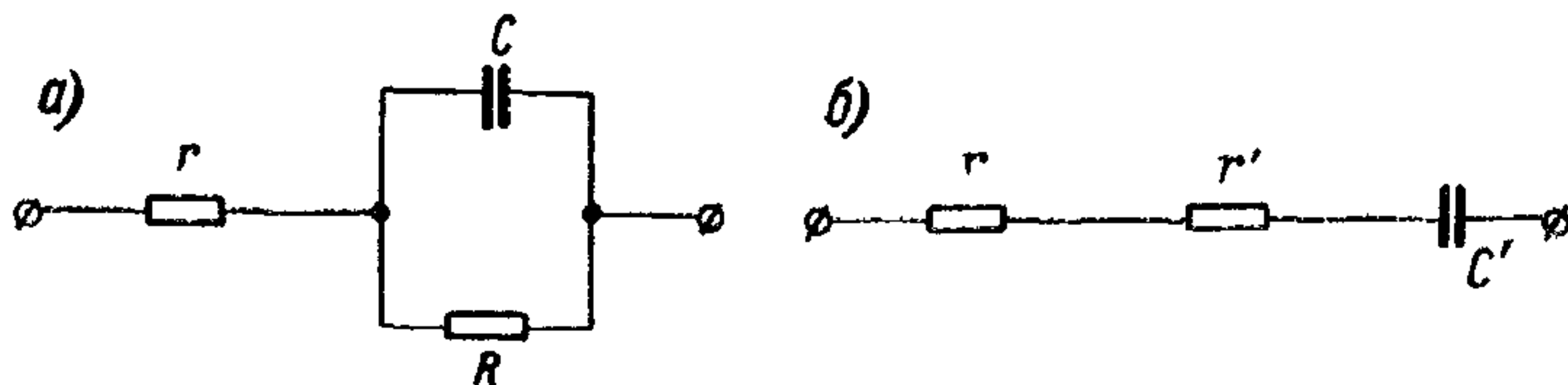


Рис. 58 Эквивалентная схема к исследованию зависимости угла потерь конденсатора от частоты: а — исходная; б — после перерасчета.

Полагая, что угол потерь невелик, принимаем $C' \approx C$; для определения величины r' используем выражения (104) и (103) и находим:

$$r' = \frac{R}{1 + \omega^2 C^2 R^2}, \text{ или } r' \approx \frac{1}{\omega^2 C^2 R},$$

если учесть, что $\omega^2 C^2 R^2 \gg 1$. Тангенс угла потерь для схемы рис. 58, б находим по формуле (102); взяв сумму сопротивлений и r' , получаем:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C \left(r + \frac{1}{\omega^2 C^2 R} \right) = \omega C r + \frac{1}{\omega C R}. \quad (114)$$

Первый член в выражении (114) будет возрастать с ростом частоты, а второй будет снижаться, поэтому при некотором значении частоты их сумма, т. е. величина $\operatorname{tg} \delta$, должна пройти через минимум. Для того чтобы найти частоту, соответствующую этому минимуму, продифференцируем выражение (114) по частоте, принимая и R не зависящими от частоты, и приравняем производную нулю

$$\frac{d \operatorname{tg} \delta}{d \omega} = C r - \frac{1}{C R \omega^2} = 0,$$

откуда находим

$$\omega = \frac{1}{C \sqrt{r R}}. \quad (115)$$

Выражение (115) показывает, что частота, соответствующая минимуму на частотной зависимости угла потерь конденсатора будет тем выше, чем меньше номинальная емкость и чем меньше сопротивление металлических частей конденсатора r . Увеличение диэлектрических потерь конденсатора характеризуется уменьшением эквивалентного сопротивления R , а следовательно, должно

также повышать значение частоты, соответствующее минимуму угла потерь.

Выражение (115) является приближенным в связи с тем, что фактически r и R зависят от частоты. Величина r должна возрастать с частотой за счет поверхностного эффекта; величина R отражает частотную зависимость угла диэлектрических потерь, который в случае полярного диэлектрика может проходить через максимум при некотором значении частоты. Все же выражение (115)

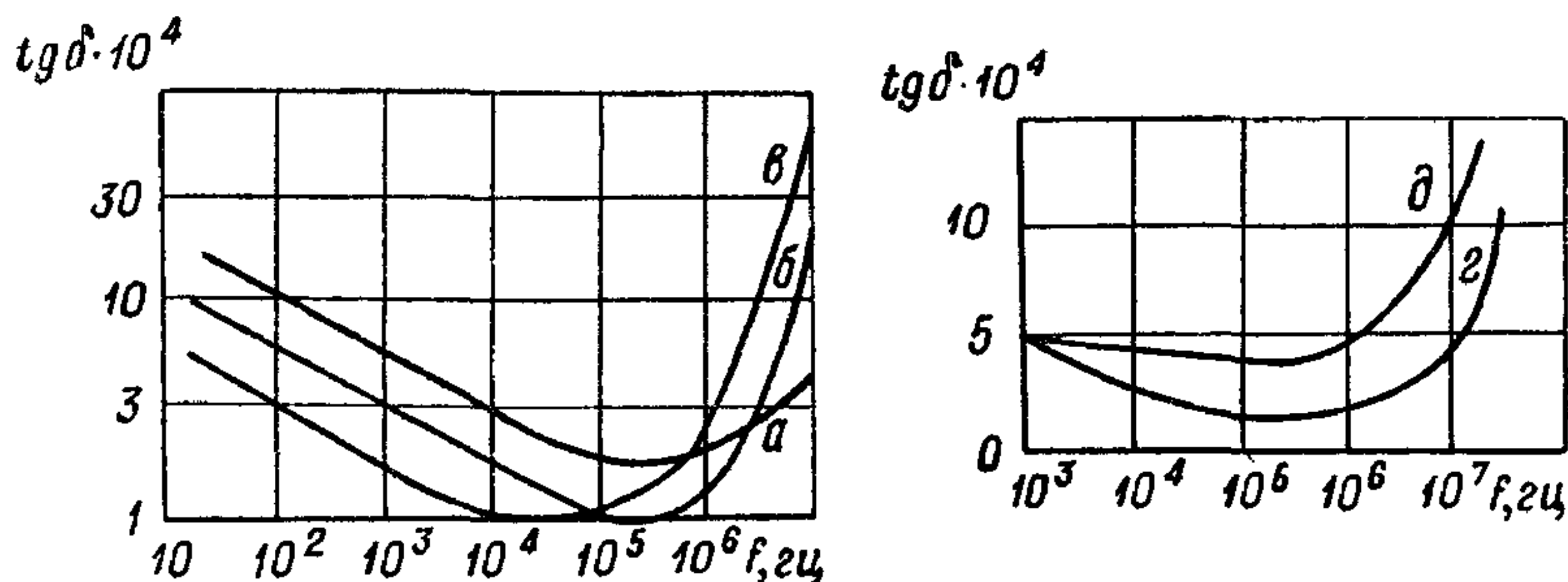


Рис. 59. Зависимость угла потерь конденсаторов от частоты; справа — пленочные конденсаторы в пластмассовых корпусах: a — 200 пф; b — 500 пф; c — 1000 пф; слева — керамические конденсаторы: d — 40 пф; e — 100 пф.

дает правильную качественную оценку частотной зависимости угла потерь конденсатора; это подтверждается рис. 59 для случая пленочных конденсаторов в пластмассовых корпусах и для высокочастотных керамических конденсаторов. Легко заметить смещение минимума $\text{tg } \delta$ в сторону высоких частот при снижении номинальной емкости конденсаторов. Повышение угла потерь в области низких частот, где преобладают диэлектрические потери при снижении номинальной емкости, объясняется в данном случае влиянием потерь в паразитных емкостях. Для того чтобы учесть это влияние, надо рассмотреть вопрос о величине угла потерь при параллельном соединении двух конденсаторов с различной величиной $\text{tg } \delta$.

§ 28. Угол потерь двух конденсаторов при их параллельном или последовательном соединении

При рассмотрении угла потерь двух параллельно соединенных конденсаторов представим их в виде параллельных эквивалентных схем (рис. 60, a), обозначив соответственно величины их емкостей C_1 и C_2 , значения сопротивлений, эквивалентных потерям в конденсаторах, R_1 и R_2 и значения тангенсов угла потерь $\text{tg } \delta_1 = 1/\omega C_1 R_1$ и $\text{tg } \delta_2 = 1/\omega C_2 R_2$. Общий тангенс угла потерь для рассматриваемого случая будет равен:

$$\text{tg } \delta = \frac{1}{\omega C_{\Sigma} R_{\Sigma}} = \frac{R_1 + R_2}{\omega (C_1 + C_2) R_1 R_2} = \frac{1}{\omega R_2 (C_1 + C_2)} + \frac{1}{\omega R_1 (C_1 + C_2)}.$$

Умножим числитель и знаменатель первого члена этого выражения на C_2 , а второго — на C_1 , получаем:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= \frac{C_2}{(C_1 + C_2)} \frac{1}{\omega C_2 R_2} + \frac{C_1}{(C_1 + C_2)} \frac{1}{\omega C_1 R_1} = \\ &= \frac{C_1 \operatorname{tg} \delta_1}{C_1 + C_2} + \frac{C_2 \operatorname{tg} \delta_2}{C_1 + C_2} = \frac{C_1 \operatorname{tg} \delta_1 + C_2 \operatorname{tg} \delta_2}{C_1 + C_2}. \end{aligned} \quad (116)$$

Таким образом, при параллельном соединении двух конденсаторов их общий $\operatorname{tg} \delta$ равен сумме произведений из вели тангенса угла потерь отдельных конденсаторов на величину соответствующей емкости, деленной на сумму емкостей, т. е. на общую емкость.

Если под емкостью C_1 принимать основную емкость конденсатора C_0 , а под емкостью C_2 паразитную емкость $C_{\text{п}}$ (приняв соо

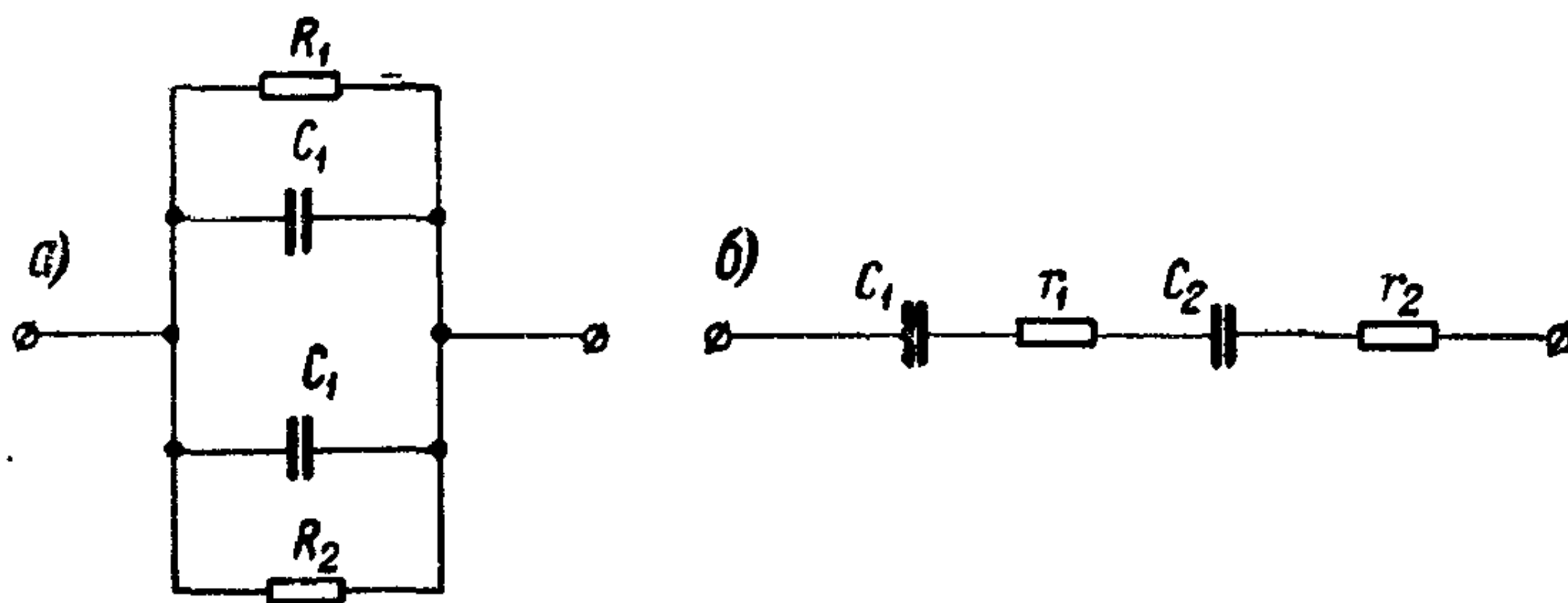


Рис. 60. Эквивалентные схемы для системы из двух конденсаторов: а — параллельное соединение; б — последовательное соединение.

ответственно $\operatorname{tg} \delta_1 = \operatorname{tg} \delta_0$ и $\operatorname{tg} \delta_2 = \operatorname{tg} \delta_{\text{п}}$) и учесть, что паразитная емкость $C_{\text{п}} \ll C_0$, так что $C_{\text{п}} + C_0 \approx C_0$, то выражению (116) можно придать вид:

$$\operatorname{tg} \delta \approx \operatorname{tg} \delta_0 + \frac{C_{\text{п}}}{C_0} \operatorname{tg} \delta_{\text{п}}. \quad (117)$$

Таким образом, величина $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора с учетом потерь в паразитной емкости (например, в опрессовочной пластмассе примерно равна сумме тангенса угла потерь основного диэлектрика и тангенса угла потерь изоляции, образующей паразитную емкость, уменьшенного в отношении $C_{\text{п}}/C_0$. Поскольку паразитная емкость относительно мало изменяется с изменением номинальной емкости конденсатора, уменьшение номинальной емкости, связанное с соответствующим снижением C_0 , должно приводить к увеличению угла потерь конденсатора за счет увеличивающегося влияния $\operatorname{tg} \delta_{\text{п}}$. Поэтому потери в паразитных емкостях, создаваемых конструктивным оформлением конденсатора (помещение в защитный изоляционный корпус, опрессовка пластмассой, лакировка, облицовка компаундом и т. п.), особенно сильно сказываются на величине $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора при малых значениях номинальной емкости (рис. 167, а, ниже).

При определении угла потерь двух последовательно соединяемых конденсаторов с емкостями C_1 и C_2 удобнее рассмотреть их последовательные эквивалентные схемы (рис. 60, б), обозначив соответствующие значения сопротивлений, эквивалентных потерям, r_1 и r_2 . В этом случае значения тангенсов углов потерь этих конденсаторов будут соответственно равны: $\operatorname{tg} \delta_1 = \omega C_1 r_1$ и $\operatorname{tg} \delta_2 = \omega C_2 r_2$.

Общий тангенс угла потерь для этого случая будет равен:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta = \omega C_{\Sigma} r_{\Sigma} &= \omega \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} (r_1 + r_2) = \frac{\omega C_1 r_1 C_2}{C_1 + C_2} + \frac{\omega C_2 r_2 C_1}{C_1 + C_2} = \\ &= \frac{C_2}{C_1 + C_2} \operatorname{tg} \delta_1 + \frac{C_1}{C_1 + C_2} \operatorname{tg} \delta_2 = \frac{C_2 \operatorname{tg} \delta_1 + C_1 \operatorname{tg} \delta_2}{C_1 + C_2}. \end{aligned} \quad (118)$$

Выражение (118) можно, в частности, использовать для вычисления потерь в конденсаторах с комбинированным диэлектриком (§ 86), когда между обкладками конденсатора используются последовательно включенные слои двух диэлектриков с толщиной d_1 и d_2 , диэлектрическими проницаемостями ϵ_1 и ϵ_2 и значениями тангенса угла потерь $\operatorname{tg} \delta_1$ и $\operatorname{tg} \delta_2$. Подставив в выражение (118) значения $C_1 = 0,0884 \frac{\epsilon_1 S}{d_1}$ и $C_2 = 0,0884 \frac{\epsilon_2 S}{d_2}$, получаем:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\frac{\epsilon_2}{d_2} \cdot \operatorname{tg} \delta_1 + \frac{\epsilon_1}{d_1} \cdot \operatorname{tg} \delta_2}{\frac{\epsilon_1}{d_1} + \frac{\epsilon_2}{d_2}} = \frac{\epsilon_2 d_1 \operatorname{tg} \delta_1 + \epsilon_1 d_2 \operatorname{tg} \delta_2}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1}. \quad (119)$$

Это выражение является приближенным, так как в нем не учитывается наличие тонких зазоров между слоями диэлектриков и между диэлектриком и обкладками (при обкладках из металлической фольги). Эти зазоры заполнены воздухом (в непропитанных конденсаторах) или пропиточной массой (в пропитанных) и при точных расчетах могут быть учтены в виде третьей емкости, включенной последовательно с емкостями C_1 и C_2 . Однако и выражение (119) может дать правильное представление о порядке величины $\operatorname{tg} \delta$ в конденсаторе с комбинированным диэлектриком.

§ 29. Зависимость угла потерь конденсаторов от напряжения

Величина напряжения, приложенного к конденсатору, может оказывать существенное влияние на величину его угла потерь, причем это влияние может вызываться различными причинами.

При наличии в конденсаторе остаточного воздуха повышение напряжения, начиная с некоторого критического значения $U_{\text{и}}$ (понижающее напряжение или напряжение короны), вызывает возрастание угла потерь конденсатора, обусловленное ионизацией воздушных включений внутри диэлектрика или у краев обкладок (рис. 61). Определение

зависимости $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора от напряжения является поэтому одним из методов обнаружения в нем остаточного воздуха и установления величины ионизирующего напряжения $U_{\text{и}}$, которое обычно рассматривается как верхняя граница допускаемого для конденсатора рабочего напряжения переменного тока.

В случае органических диэлектриков превышение рабочего напряжения над ионизирующим напряжением, обуславливающее быстрое развитие ионизационных процессов, вызывает выход конденсатора из строя не только за счет возрастания температуры, вызванного появлением потерь на ионизацию, но и за счет непо-

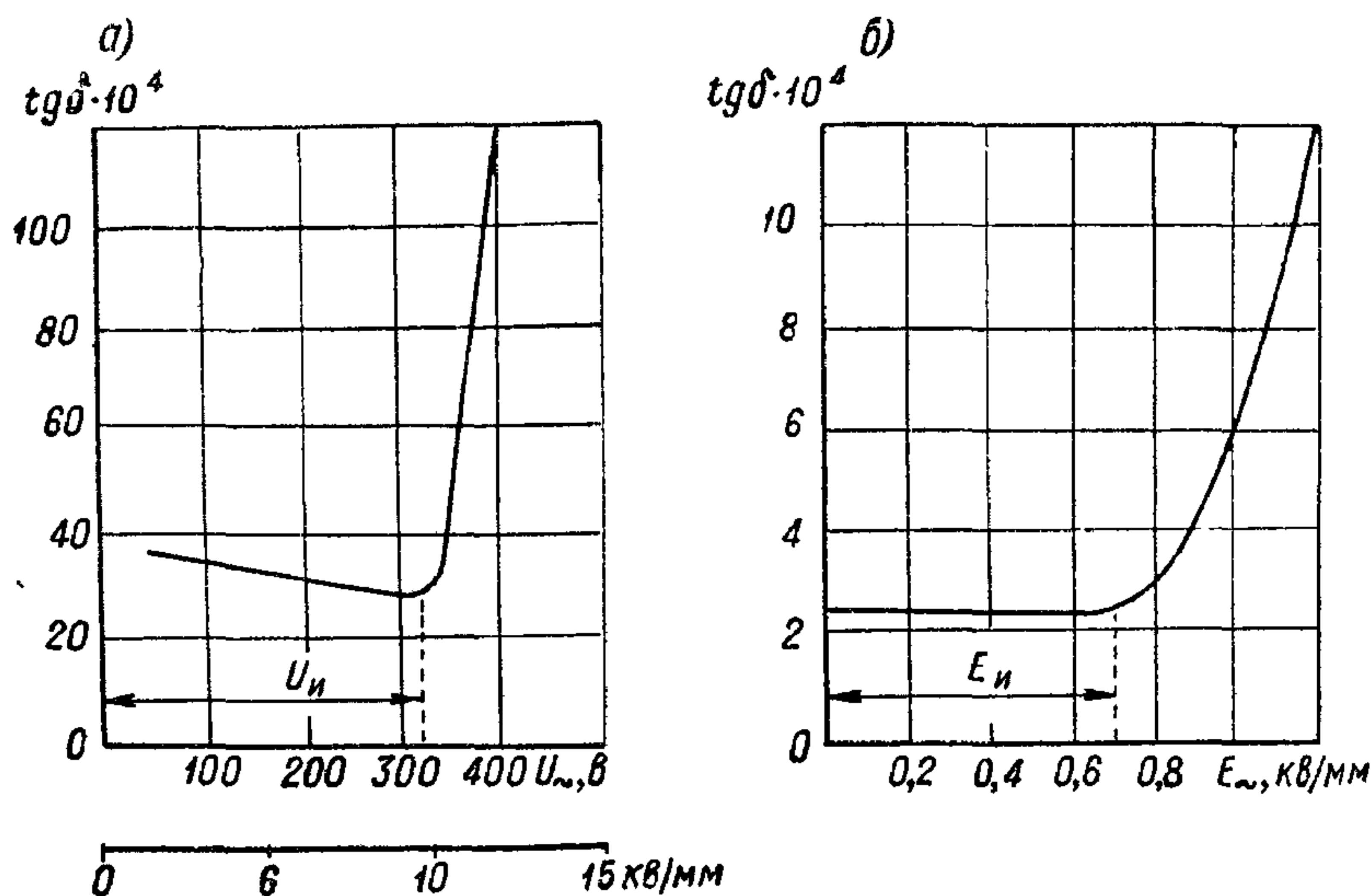


Рис. 61. Зависимость угла потерь конденсаторов от напряженности поля в диэлектрике: а — бумажный парафинированный конденсатор (частота 50 гц); б — керамический конденсатор (частота 1 Мгц).

средственного разрушения диэлектрика при воздействии на него разрядов.

В случае неорганических диэлектриков, обладающих более высокой химической стойкостью, разрушение диэлектрика разрядами в процессе ионизации остаточного воздуха может и не сказываться, но остается опасность местного перегрева, способного привести к оплавлению обкладок, тепловому пробое диэлектрика или к его механическому разрушению за счет напряжений, возникающих при неравномерном нагреве в локализованном участке, где начала развиваться интенсивная ионизация. Вопрос о процессе ионизации в конденсаторах будет нами рассмотрен более подробно в последующем изложении (§ 35).

При наличии в диэлектрике конденсатора междуслойной поляризации может наблюдаться аномальное возрастание угла потерь конденсатора при снижении напряжения, в области небольших напряжений, особенно заметное при повы-

шенных температурах и низкой частоте (рис. 62). В этом случае значительная часть общих потерь, а следовательно, и активная составляющая тока через конденсатор, обусловлены колебательным движением ионов в прослойках пропитывающей жидкости, заполняющей зазоры между слоями диэлектрика или между диэлектриком и обкладками.¹ С увеличением напряжения увеличивается амплитуда колебания ионов и растет активная составляющая тока I_A ; при некотором напряжении амплитуда колебания ионов достигает значения, равного толщине зазора, и дальнейшее

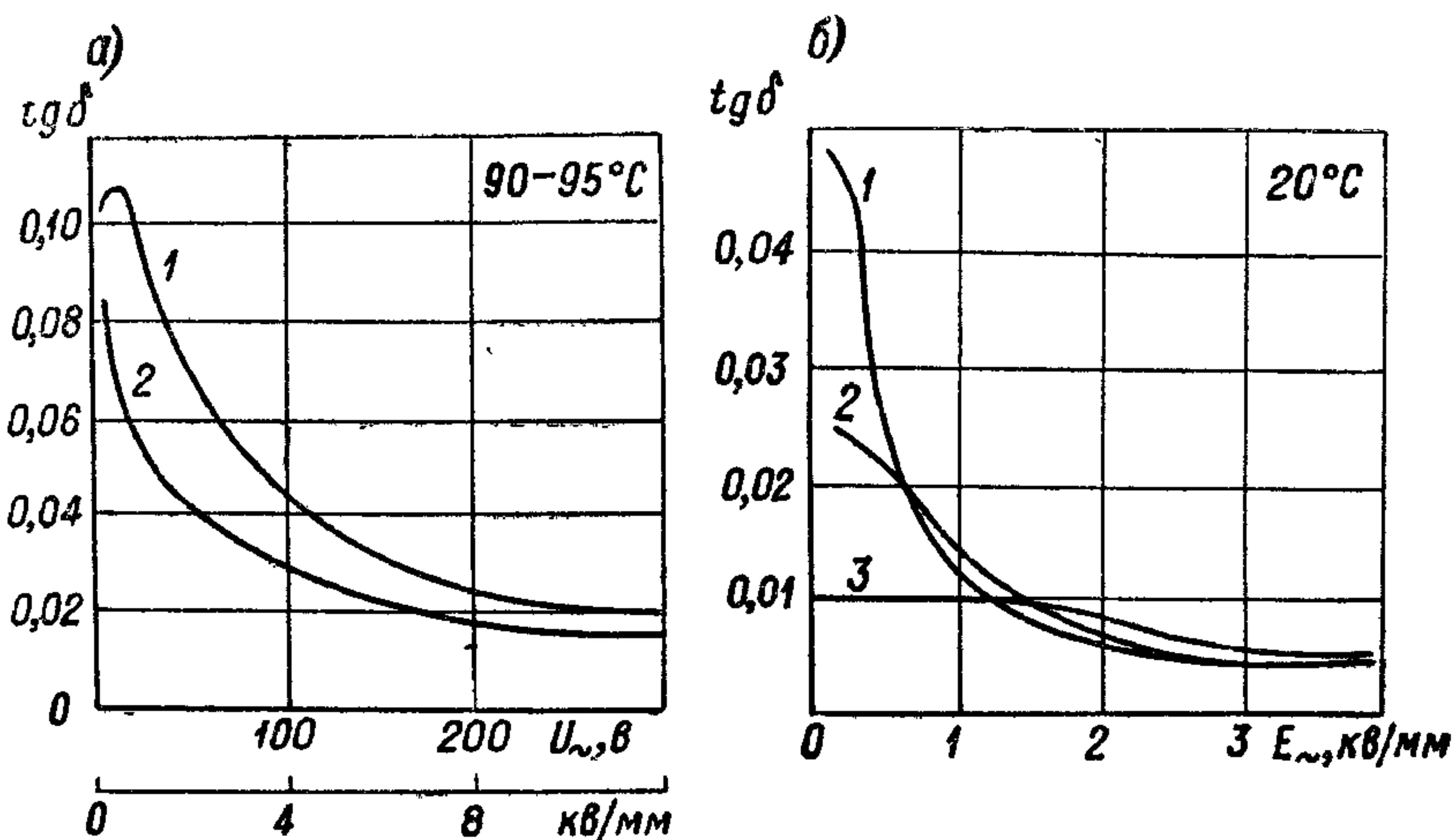


Рис. 62. Зависимость угла потерь от напряженности поля, вызванная междуслойной поляризацией: а — бумажные конденсаторы при частоте 50 гц:

1 — пропитанный касторовым маслом; 2 — пропитанный пентахлордифенилом;

б — образцы кабельной бумаги, пропитанные загрязненным нефтяным маслом:

1 — частота 5 гц; 2 — частота 20 гц; 3 — частота 60 гц.

возрастание I_A с ростом напряжения прекращается, тогда как реактивная емкостная составляющая тока I_R продолжает расти (поскольку емкость конденсатора лишь в небольшой степени определяется междуслойной поляризацией); в связи с этим отношение I_A/I_R , т. е. $\text{tg } \delta$, начинает снижаться с ростом напряжения.

Увеличение частоты ослабляет это явление, так как уменьшает путь, который успевают пробежать ионы за каждую половину периода; повышение температуры, наоборот, усиливает данное явление, так как растет проводимость массы в зазоре, т. е. увеличивается количество движущихся в нем ионов. Полярные пропитывающие жидкости обладают увеличенной проводимостью, и для них это явление выражено более резко, чем для неполярных

¹ Теорию этого вопроса см. С. G. Garton, J. IEE, 88, Pt II, 1941, № 2, p. 103—120.

жидкостей. когда заметное возрастание $\operatorname{tg} \delta$ при снижении напряжения можно наблюдать только после определенного периода старения конденсатора, вызывающего увеличение проводимости пропиточной массы до достаточно заметных значений. При пропитке твердыми массами это явление не должно иметь места, однако оно было обнаружено Яном Штофа для бумажных конденсаторов, пропитанных хлорнафталином, при температурах, близких к его точке плавления, когда пропиточная масса была уже заметно размягчена.

С помощью моста переменного тока можно скомпенсировать реактивную составляющую тока I_R и выделить одну активную I_A ,

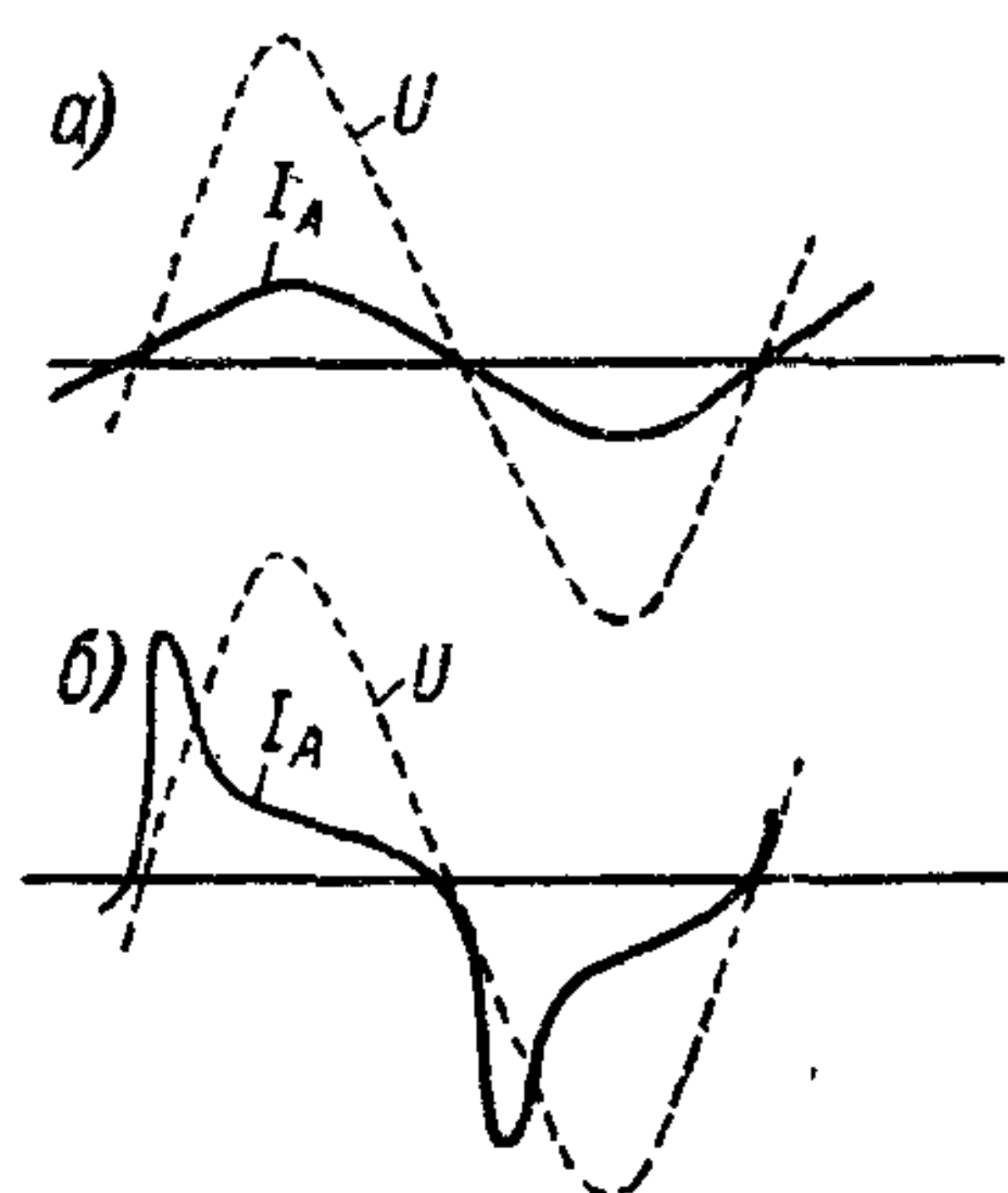


Рис. 63. Появление бросков активного тока при увеличении проводимости пропиточной массы: а — проводимость $7 \cdot 10^{13} \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$; б — проводимость $63 \cdot 10^{13} \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

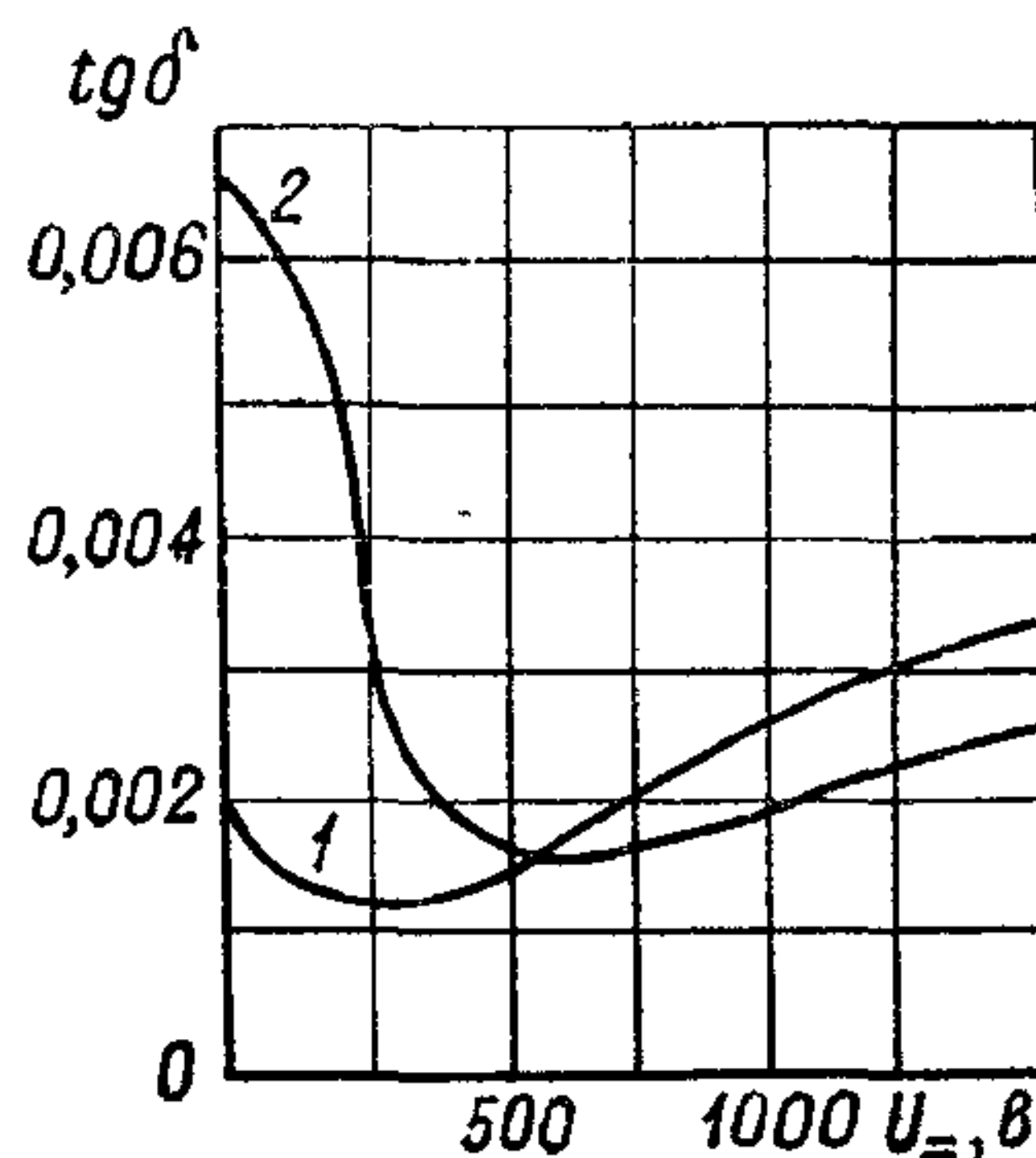


Рис. 64. Влияние наложения постоянной составляющей напряжения на угол потерь бумажных конденсаторов при 70°С с переменной составляющей 250 в, 50 гц. 1 — пропитка нефтяным маслом; 2 — пропитка пентахлордифенилом.

изменения которой во времени при соответствующих изменениях напряжения можно зафиксировать на экране осциллографа (рис. 63). При увеличенной проводимости пропиточной массы нарушается синусоидальный характер активного тока, и в начале каждого полупериода можно заметить броски тока, обусловленные движением ионов в направлении стенок зазора.

Если на напряжение переменного тока, при котором наблюдается данное явление, наложить постоянное напряжение, превышающее амплитуду переменного, то ионы жидкости будут прижаты к одной из стенок зазора, и ионный пик на кривой тока исчезнет; одновременно можно зафиксировать и снижение угла потерь по сравнению с тем значением, которое он имел до наложения постоянного напряжения (рис. 64); значительное увеличение постоянной составляющей напряжения может уже вызвать увеличение $\operatorname{tg} \delta$ за счет роста сквозной проводимости.

Практически с явлением аномального возрастания угла потерь в области низких напряжений приходится считаться в случае бумажных или пленочных пропитанных конденсаторов, когда жидкий диэлектрик, использованный для пропитки, имеет повышенную проводимость. В частности, при изготовлении бумажных конденсаторов, пропитанных хлордифенилом, это явление используется для контроля наличия загрязнений в пропиточной массе

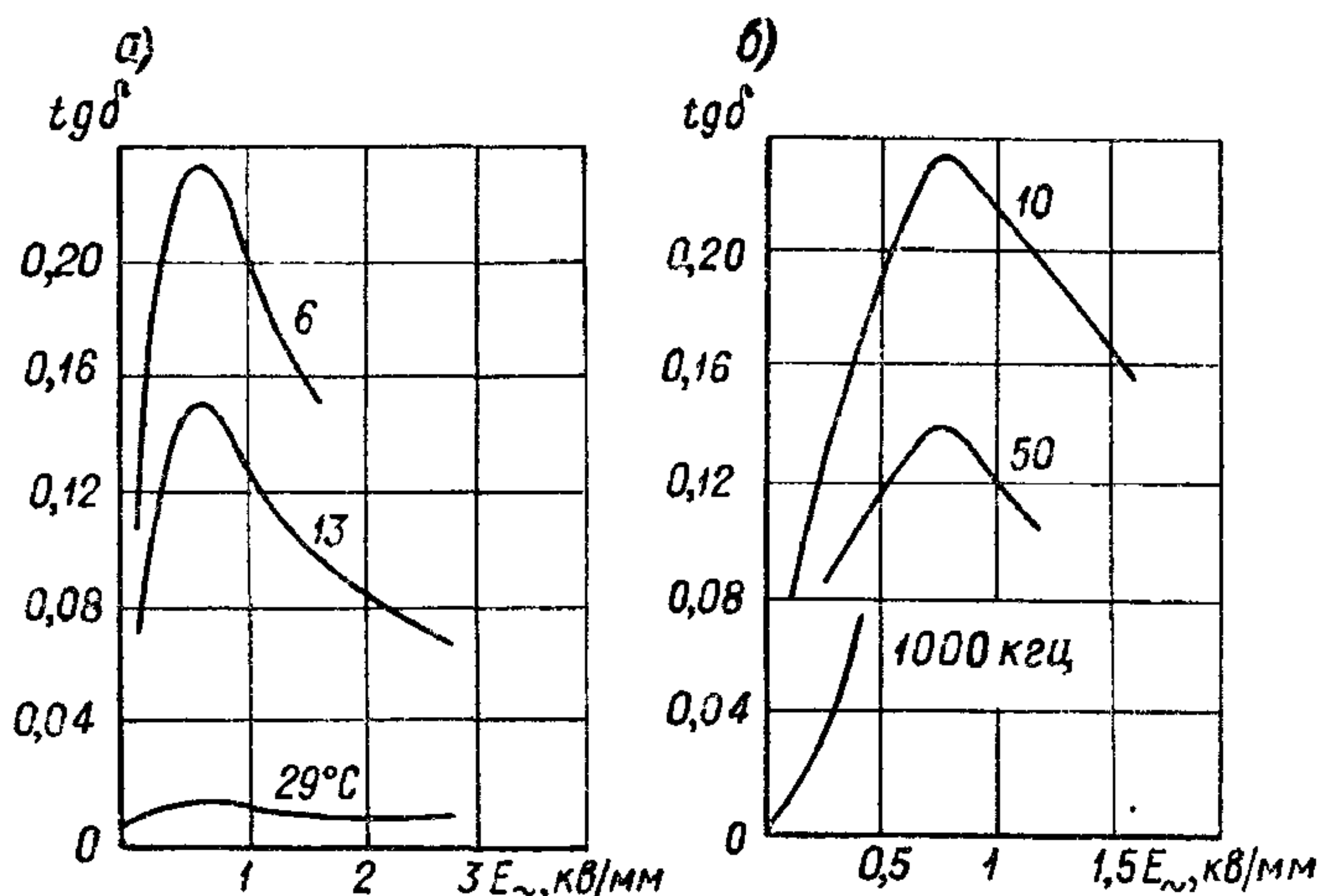


Рис. 65. Зависимость угла потерь от напряженности поля для сегнетокерамики состава: 31% SrTiO_3 + 69% BaTiO_3 ; а — влияние температуры при частоте 1 кГц; б — влияние частоты при температуре 5° С.

в готовых конденсаторах путем сравнения величины $\text{tg } \delta$, измеренной при 10% и 100% номинального рабочего напряжения.

Для диэлектриков со спонтанной поляризацией (в случае сегнетокерамических конденсаторов) может наблюдаться резкая зависимость $\text{tg } \delta$ от напряженности поля, обусловленная особенностями данного вида поляризации (рис. 65). Характер этой зависимости при заданном составе сегнетокерамики заметно зависит от температуры и частоты. Следует отметить, что для таких конденсаторов (нелинейных) понятие угла потерь носит условный характер, так как кривая тока в цепи с подобным конденсатором отличается от синусоиды.

§ 30. Расчет величины потерь в конденсаторах при несинусоидальном напряжении

Кривая напряжения в сети переменного тока считается синусоидальной, если ни одна из ее ординат не отличается от соответствующей ординаты основной синусоиды более чем на 5% максимального значения последней. Фактически кривая напряжения может и более заметно отличаться от синусоиды. Такую кривую

можно рассматривать как сумму синусоидальных кривых (высших гармонических), имеющих различную частоту:

$$U = \sum_{k=1}^{k=n} U_{mk} \sin(k\omega_1\tau + \beta_k), \quad (120)$$

где β_k — угол, определяющий положение вектора U_{mk} .

Действующее значение тока для k -той гармоники будет равно:

$$I_k = \frac{U_k}{z_k} = \frac{U_{mk}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{k\omega_1 C} - k\omega_1 L\right)^2}}, \quad (121)$$

где I_k — в а, U_k — в в, r — в ом, L — в гн, C — в ф.

Суммарное значение тока будет равно:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + \dots + I_k^2 + \dots + I_n^2}. \quad (122)$$

(Четные гармоники отсутствуют, так как принято, что кривая напряжения симметрична.)

Наличие высших гармоник приводит к увеличению потерь в конденсаторе как за счет увеличения потерь в обкладках, вызванного возрастанием суммарного тока через конденсатор, так и за счет увеличения потерь в диэлектрике вследствие наложения повышенной частоты.

Для определения потерь в конденсаторе при искаженной кривой напряжения, содержащей высшие гармоники, надо произвести разложение этой кривой на синусоидальные составляющие (гармоники) одним из применяемых для этой цели методов, вычислить потери для каждой гармоники, а затем сложить их. При этом надо учитывать напряжение каждой гармоники, ее частоту и брать для расчета значение $\operatorname{tg} \delta$, соответствующее данной частоте.

Активная мощность, выделяемая в конденсаторе k -той гармоникой, будет равна:

$$P_{Ak} = U_k^2 \omega_k C \operatorname{tg} \delta_k = k U_k^2 \omega_1 C \operatorname{tg} \delta_k.$$

Суммарная активная мощность для n гармоник составит:

$$P_A = \sum_{k=1}^{k=n} P_{Ak} = \omega_1 C \sum_{k=1}^{k=n} k U_k^2 \operatorname{tg} \delta_k = \eta U_{\text{д}}^2 \omega_1 C \operatorname{tg} \delta_1, \quad (123)$$

где η коэффициент возрастания потерь за счет искажения формы кривой напряжения:

$$\eta = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} k U_k^2 \operatorname{tg} \delta_k}{U_{\text{д}}^2 \operatorname{tg} \delta_1} = \sum_{k=1}^{k=n} k a_k^2 b_k; \quad (124)$$

здесь $a_k = \frac{U_k}{U_{\text{д}}}$ и $b_k = \frac{\operatorname{tg} \delta_k}{\operatorname{tg} \delta_1}$.

Значение U_d , входящее в формулы (123) и (124), представляет собой действующее значение напряжения искаженной кривой, которое вычисляется как

$$U_d = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + \dots + U_k^2 + \dots + U_n^2}.$$

На рис. 66 показаны значения коэффициентов возрастания потерь для бумажномасляного конденсатора при четырех сильно искаженных кривых напряжения и форма соответствующих кривых, снятая осциллографом; кривая 4 — несимметрична и в ее состав входят не только четные, но и нечетные гармоники. Приведенные данные показывают, что при сильно искаженных кривых напряжения потери в конденсаторе могут возрасти в несколько раз.

Если в пределах n рассматриваемых гармоник угол потерь мало изменяется с частотой, то можно принять коэффициент возрастания потерь за счет искажения формы кривой напряжения равным:

$$\eta = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} k U_k^2}{U_d^2} = \frac{U_1^2 + \dots + k U_k^2 + \dots + n U_n^2}{U_1^2 + \dots + U_k^2 + \dots + U_n^2}.$$

Существенное искажение кривой напряжения наблюдается при наличии в сети ртутных выпрямителей, которые могут создавать 5, 7 и 11-ю гармоники. При больших значениях тока этих гармоник напряжение на конденсаторе надо снижать, чтобы избежать его недопустимого перегрева, как показано на рис. 67 для американских бумажных силовых конденсаторов, пропитанных хлордифенилом, мощностью 10—15 квар. Эти данные соответствуют одновременному существованию лишь одной из вышеупомянутых гармоник.

При наличии ряда гармоник в кривой напряжения допускаемое напряжение на конденсаторе $U_{доп}$ определяется соотношением

$$U_{доп} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^{k=n} I_k^2} \leq k_{п} P_{R_{ном}}. \quad (125)$$

Здесь $k_{п}$ — допустимая перегрузка по мощности, которая, например, для американских силовых конденсаторов принята равной 35%.

В современной технике конденсаторы часто подвергаются воздействию периодических импульсов напряжения различной формы, далекой от синусоидальной.

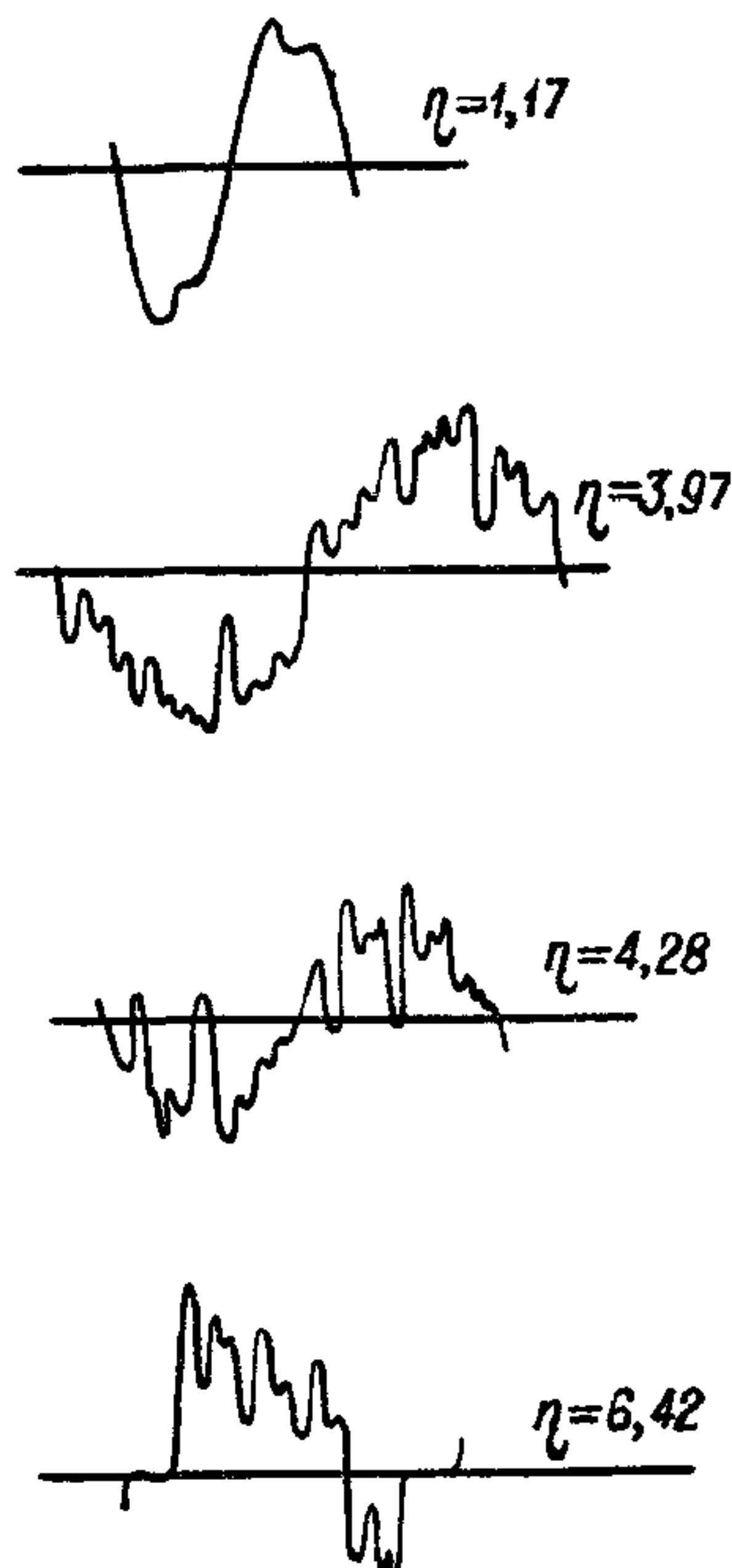


Рис. 66. Значения коэффициента η при различном характере искажения кривой напряжения высшими гармониками.

В этом случае также можно воспользоваться методом разложения кривой напряжения на составляющие ее гармоники (в ряд Фурье) и вести расчет потерь так же, как было показано выше для случая искаженной синусоидальной кривой.

В некоторых случаях, особенно при большой крутизне фронта нарастания напряжения импульса, использование метода разложения в ряд Фурье связано с трудностями. В связи с этим предложен упрощенный метод расчета¹ с применением эквивалентной последовательно-параллельной схемы замещения реального конденсатора, подобно той, которая была показана выше на рис. 58, а. Полагая, что $R \gg r$, можно считать, что к сопротивлению R приложено все напряжение, подведенное к конденсатору, и что ток, протекающий через сопротивление r , определяется только ем-

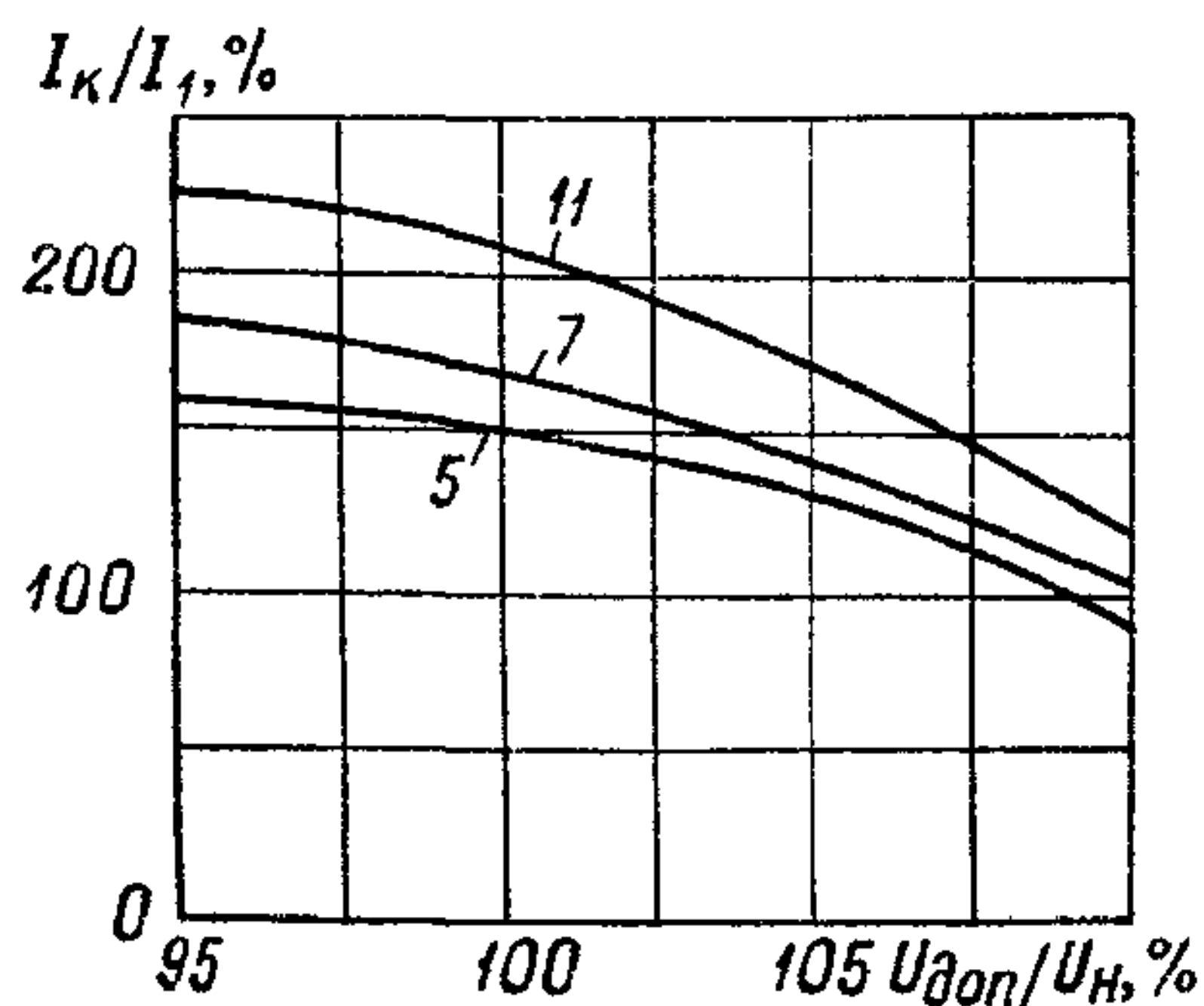


Рис. 67. Американские нормы на допустимую нагрузку силовых конденсаторов токами высших гармоник.

кой периодических импульсов, а соответствующее изменение тока находится по выражению

$$I(x) = -C \frac{dU(x)}{d\tau}.$$

Для того чтобы найти значения R и r , которые входят в расчетные формулы, приведенное выше выражение (114) для tg преобразуется так:

$$\text{tg } \delta = \frac{a}{\omega} + b\omega.$$

Находится экспериментально частотная зависимость угла потерь и строится кривая $\text{tg } \delta = f(\omega)$ в билогарифмической системе координат; эта кривая будет иметь U -образную форму, причем ее нисходящая и восходящая ветви должны быть близки к прямым (см., например, кривые $a, б, в$ на рис. 59). Выбирая точку на левом линейном участке с координатами $\text{tg } \delta_1$ и ω_1 , находим значение a

костью конденсатора. В этом случае среднее значение активной мощности, выделяемой в конденсаторе, можно представить выражением

$$P_A = P_R + P_r = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{U^2(x)}{R} dx + \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I^2(x) r dx. \quad (126)$$

Здесь $x = \omega\tau$, где ω — круговая частота и τ — время.

Закон изменения напряжения во времени задается формой кривой периодических импульсов, а соответствующее изменение тока

¹ См., например, Н. Hagedorn. «Frequenz», 1965, 19, № 11, с. 370—374.

и, следовательно, R , а выбрав точку $\operatorname{tg} \delta_2$ и ω_2 на правом восходящем прямолинейном участке, находим b и r .

Обычно в расчетные формулы для величины потерь прямо вводят значения a и b вместо R и r .

Часто приходится иметь дело с импульсами, по форме близкими к трапеции. Для этого случая Пейссу¹ предложил следующую приближенную формулу для расчета потерь:

$$P_A = \frac{U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta}{8} \cdot \frac{0,78}{\alpha^2 (1 - \beta)^2}, \quad (127)$$

где $\alpha = \theta/T$ и $\beta = \varphi/\theta$ (см. рис. 68).

Чем больше отношение φ к θ , т. е. чем ближе трапеция к прямоугольнику, тем больше величина P_A . Для чисто прямоугольных импульсов величина потерь должна достигать бесконечно большого значения. Однако применяемые на практике прямоугольные импульсы всегда имеют некоторый фронт τ_ϕ , т. е. фактически имеют форму трапеции и их углы несколько закруглены,

и потому и при такой форме импульса потери в конденсаторе имеют конечное значение. Тем не менее надо иметь в виду, что при увеличении крутизны подъема напряжения, т. е. при уменьшении длины фронта импульса τ_ϕ , потери резко возрастают. От длительности импульса θ потери практически не зависят, но линейно возрастают с ростом частоты повторения импульсов ω . Величину $\operatorname{tg} \delta$ в формуле (127) надо брать соответствующей этому значению частоты. Расчет по этой формуле дает завышенные значения потерь в сравнении с опытными данными.

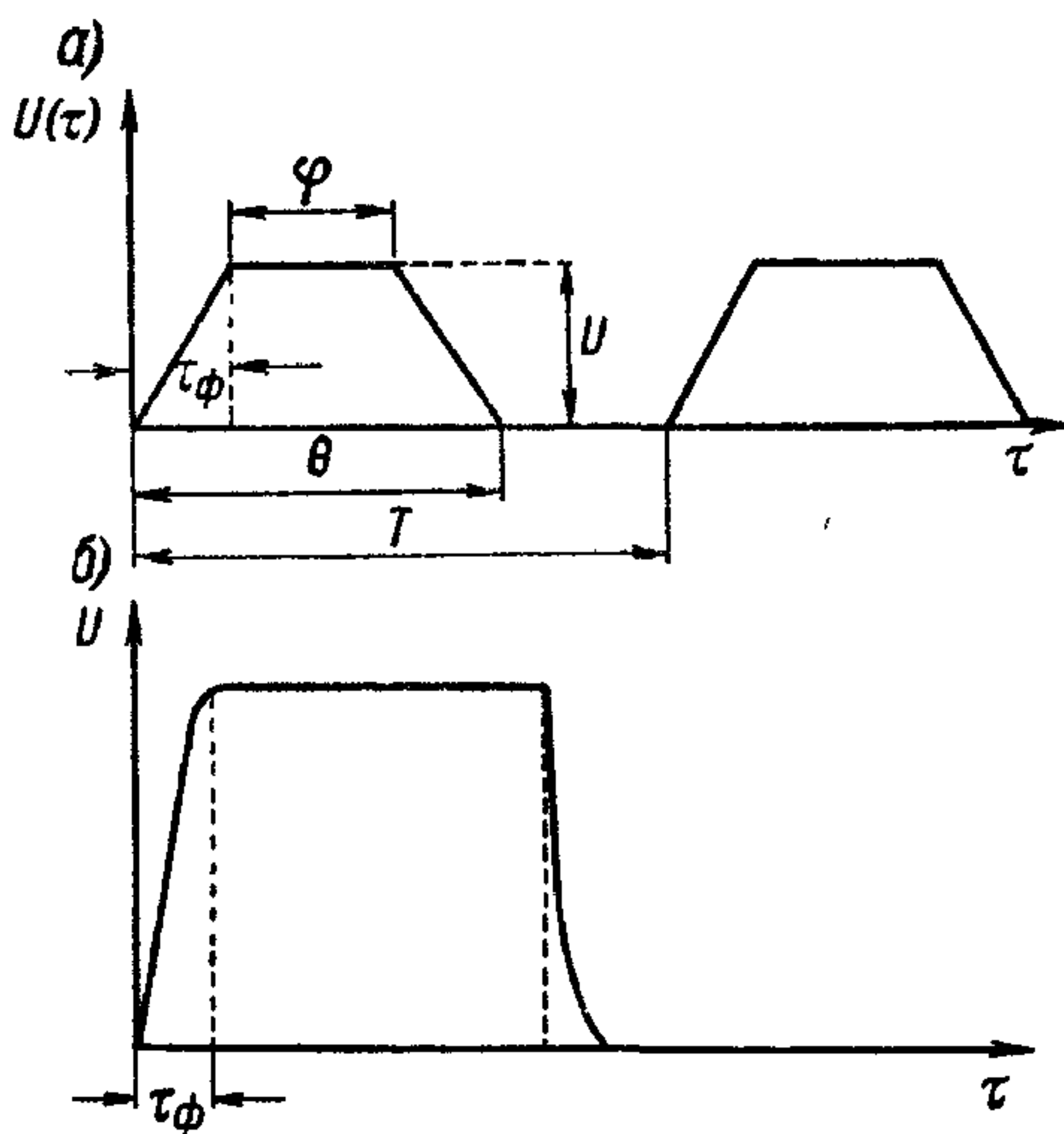


Рис. 68. К расчету потерь при импульсном напряжении: а — трапецидальные импульсы; б — импульс напряжения, близкий к прямоугольному.

Глава VI

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ КОНДЕНСАТОРОВ

§ 31. Общие сведения о пробое диэлектриков

Электрическую прочность можно рассматривать как важнейшую характеристику качества конденсатора. Действительно, если емкость конденсатора заметно отклонилась от заданного

¹ J. Peyssou, «Ann. Radioelectr.», 1956, V, 11, № 46.

значения, постоянная времени снижена или потери увеличены, то это означает, что конденсатор будет работать плохо, но все же как-то будет работать. Если же нарушается электрическая прочность конденсатора и происходит пробой диэлектрика, то между обкладками конденсатора устанавливается короткое замыкание, и конденсатор полностью отказывает в работе (если он не обладает свойством «самовосстановления» при пробое, см. § 23 выше и § 84 ниже). В электронной технике это явление приводит обычно к отказу в работе аппаратуры, в которой использовался данный конденсатор; подобные отказы, очевидно, особенно опасны в схемах ракетной или космической электроники. В силовой электротехнике пробой конденсатора часто может привести к серьезной аварии в энергосистеме.

Электрическая прочность конденсатора зависит прежде всего от толщины и от качества диэлектрика, разделяющего обкладки. Кроме того, эта характеристика зависит и от особенностей конструкции конденсатора: площади обкладок, условий теплоотдачи и т. д., а также и от технологических режимов изготовления конденсаторов.

Электрическая прочность диэлектрика характеризуется величиной пробивной напряженности $E_{\text{пр}}$, представляющей собой отношение пробивного напряжения $U_{\text{пр}}$ к толщине диэлектрика d :

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{d}, \quad (128)$$

где $E_{\text{пр}}$ — в кВ/мм при $U_{\text{пр}}$ — в кВ и d — в мм, или в в/мкм при $U_{\text{пр}}$ — в в и d — в мкм.

Если напряженность поля в диэлектрике достигает значения, равного $E_{\text{пр}}$, то происходит пробой диэлектрика конденсатора и последний выходит из строя.

В газобразных диэлектриках пробой носит чисто электрический характер и может быть объяснен теорией ударной ионизации. Согласно этой теории, пробой газа происходит тогда, когда кинетическая энергия свободных ионов (электронов), движущихся в газе при воздействии электрического поля, делается достаточной для того, чтобы при ударах о встречные молекулы вызывать ионизацию последних, т. е. создавать новые ионы. При этом происходит быстрое нарастание количества свободных ионов в газе (образуется ионная лавина¹) и проводимость газа возрастает до больших значений.

Скорость движения иона в газе, определяющая его кинетическую энергию, зависит не только от напряженности поля E , но и от средней длины свободного пробега иона λ , т. е. от среднего расстояния, которое ион может пройти от момента одного столкнове-

¹ Точнее «электронная лавина», так как ионизация обычно вызывается электронами.

ния с молекулой до момента следующего столкновения. При нормальном давлении величина λ относительно велика и движущийся ион накапливает достаточную энергию для начала ударной ионизации уже при небольших значениях E . Поэтому электрическая прочность газов невелика. Например, для воздуха в однородном поле при зазорах порядка 1—10 мм она составляет всего 3 кВ/мм (амплитудное значение). С увеличением давления газа величина λ уменьшается и электрическая прочность возрастает пропорционально росту давления (в пределах до 10—15 ат), так как при меньших значениях λ требуется более высокая напряженность поля, чтобы накопить энергию ионов, достаточную для ударной ионизации.

При уменьшении давления газа по сравнению с нормальным атмосферным (например, в случае воздуха при подъеме на большие высоты) электрическая прочность будет снижаться за счет соответствующего увеличения λ . Это приходится учитывать при проектировании электронного оборудования для самолетов. Однако при переходе в область высокого вакуума, т. е. при очень малых давлениях, электрическая прочность газа снова возрастает (рис. 69). Это объясняется тем, что количество молекул в единице объема резко снижается и уменьшается вероятность столкновения движущихся ионов с молекулами.

Применяя повышенное давление, можно повысить прочность газовой изоляции в 10—20 раз. Еще более высокие значения электрической прочности можно получить, применяя вакуум (снижение давления до величины порядка 10^{-6} мм рт. ст. и ниже). Особым преимуществом газообразной изоляции является полная восстанавливаемость ее электрической прочности после пробоя.

Для электрической прочности газов является характерным существование некоторого критического значения напряжения $U_{пр. мин}$, величина которого несколько различна для разных газов, составляя от 280 до 420 в. Для воздуха $U_{пр. мин} \approx 350$ в (ампл.) или 250 в (эфф.). Если напряжение ниже этого значения, то пробой не происходит независимо от давления или величины зазора. Поэтому при малых зазорах электрическая прочность воздуха, даже при нормальном давлении, оказывается повышенной: например, разделив 250 в на величину зазора 10 мм, мы получаем пробивную напряженность 25 кВ/мм, т. е. примерно в 10 раз выше, чем при зазорах порядка 1—10 мм. С электрической прочностью воздуха в конденсаторостроении приходится сталкиваться не только при конструировании воздушных конденсаторов, но и при изготовле-

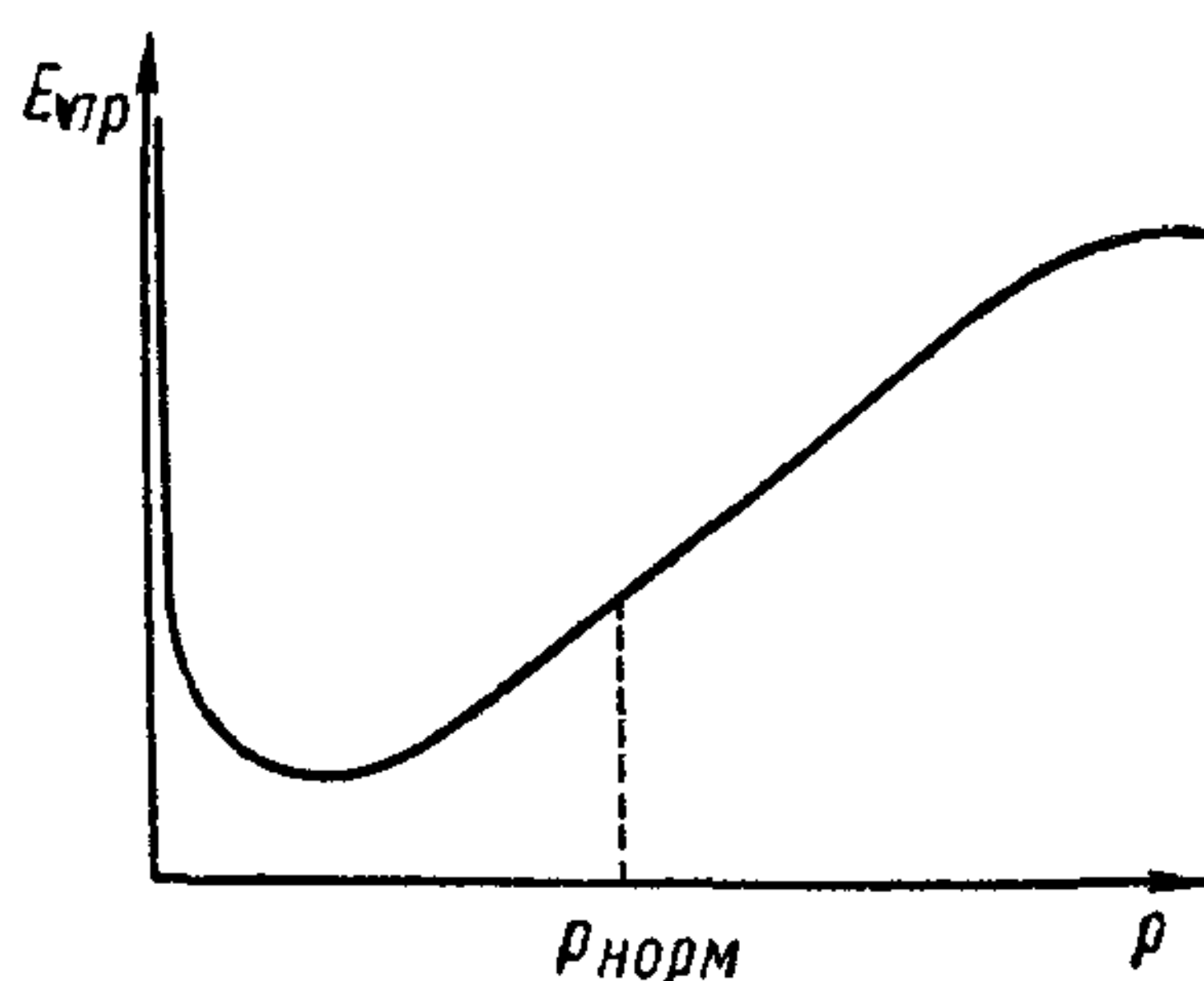


Рис. 69. Общий характер зависимости электрической прочности газа от давления.

нии конденсаторов с твердым диэлектриком; в этом случае внутри диэлектрика или у краев обкладок могут встречаться воздушные

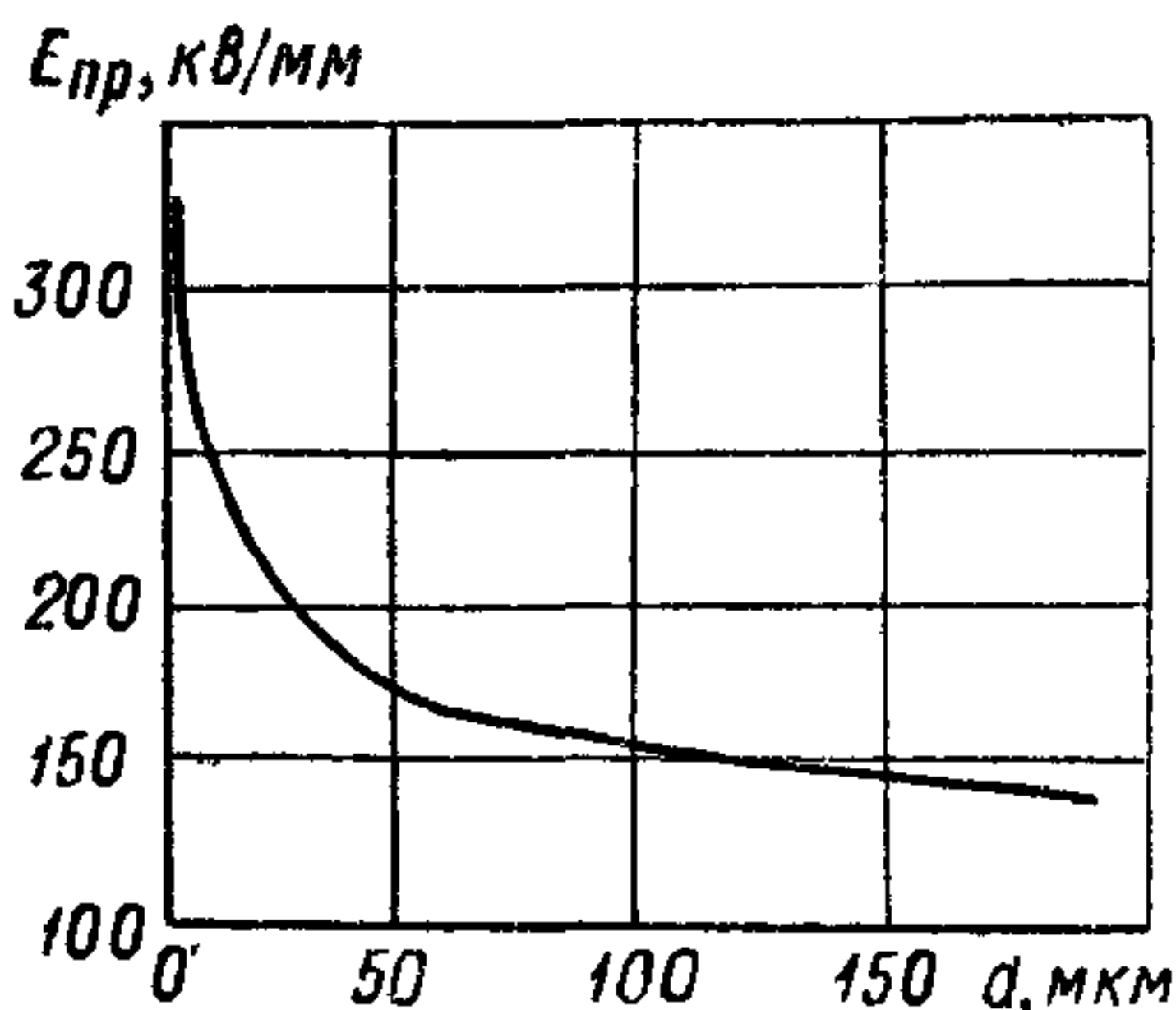


Рис. 70. Зависимость электрической прочности жидкого углеводорода C_7H_{10} от величины зазора.

включения, которые начинают разрушаться электрическим полем раньше, чем может произойти пробой твердого диэлектрика. Кроме того, приходится учитывать возможность поверхностного разряда на границе раздела между воздухом и твердым диэлектриком по поверхности выводных изоляторов или по поверхности изоляционного корпуса, если таковой использован в конструкции конденсатора.

В случае очень чистых и тщательно обезгаженных жидкостей явление пробоя также можно объяснить с точки

зрения ионизационной теории. Жидкие диэлектрики имеют увеличенную плотность по сравнению с газами; поэтому значение λ в них резко снижено и пробивная напряженность резко увеличена по сравнению с $E_{пр}$ для газов при нормальном давлении.

Для очень чистой жидкости при малых зазорах $E_{пр}$ может превышать 100 кВ/мм (рис. 70). Для жидких диэлектриков технической очистки значения $E_{пр}$ лежат значительно ниже в связи с неизбежным присутствием остаточных пузырьков воздуха, влаги и механических примесей. Под действием электрического поля частички загрязнений, содержащихся в жидком диэлектрике и имеющих величину ϵ , отличающуюся от ϵ жидкого диэлектрика, располагаются в виде цепочки от электрода к электроду; подобные цепочки образуют слабые места, по которым и происходит пробой. Однако и при технической очистке электрическая прочность жидкого диэлектрика может быть получена около 20—25 кВ/мм при зазорах по-

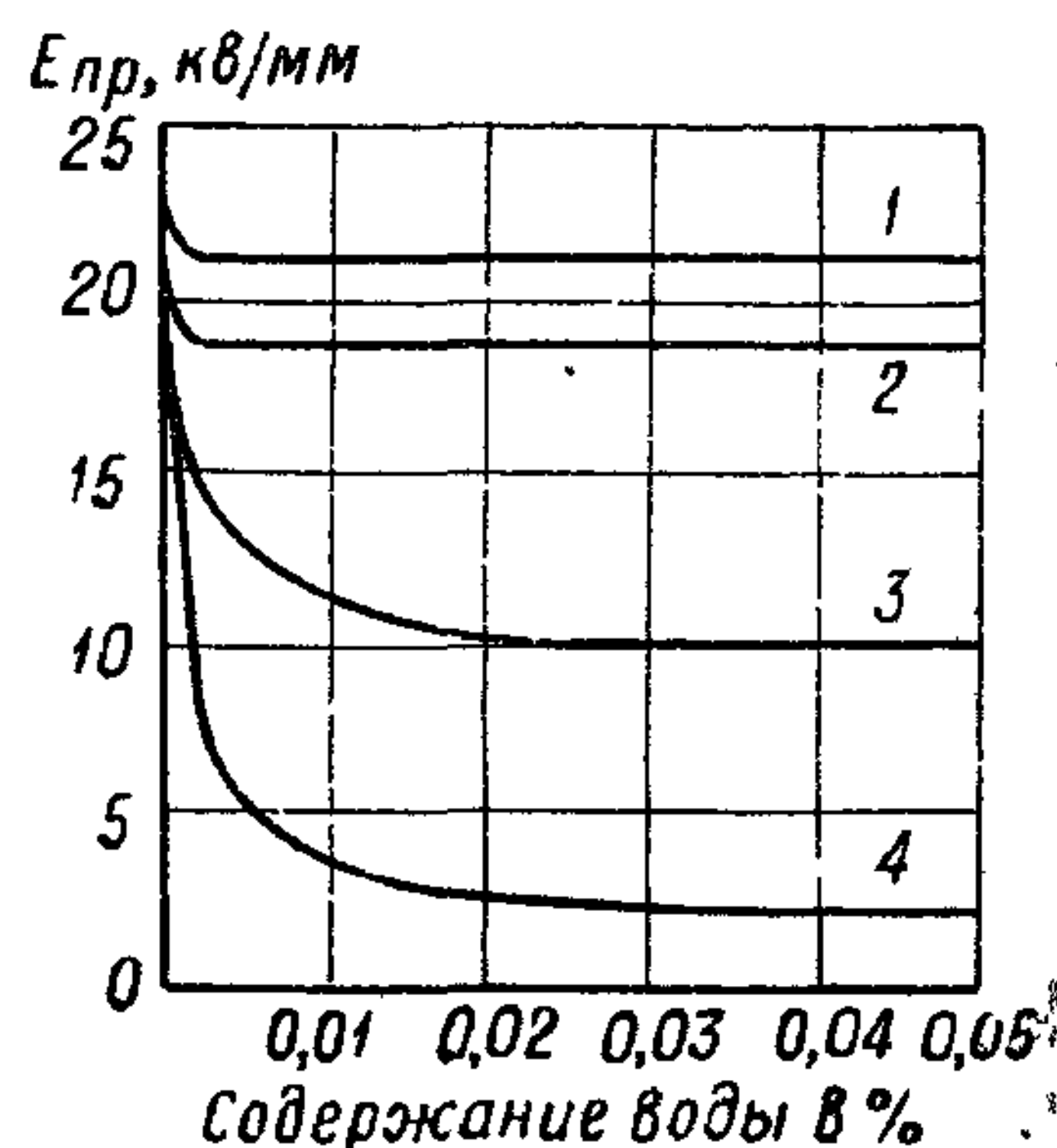


Рис. 71. Зависимость электрической прочности нефтяного масла от содержания влаги при разной степени загрязнения.

1 — чистое масло; 2 — 351 мг углерода на 10 л масла; 3 — 2,5 мг волокон целлюлозы на 10 л масла; 4 — 2,8 мг волокон хлопка на 10 л масла.

рядка нескольких миллиметров, т. е. почти в 10 раз выше, чем для воздуха при нормальном давлении. Зависимость $E_{пр}$ для типичного жидкого диэлектрика — нефтяного масла от степени увлажнения при различном содержании механических примесей, приведенная на рис. 71, наглядно показывает, какое

большое внимание надо уделять сушке и очистке жидких диэлектриков, чтобы обеспечить достаточно высокие значения их электрической прочности. При наличии в жидкости газового пузырька он обычно оказывается очагом для развития пробоя; поэтому в конденсаторостроении уделяют большое внимание вопросу обезгаживания жидких диэлектриков перед их использованием в конденсаторах.

Восстанавливаемость электрической прочности жидкостей после пробоя менее совершенна, чем газов, так как происходит загрязнение жидкости продуктами ее разложения, образующимися в момент пробоя. В случае жидкостей большой вязкости, особенно если они склонны к выделению углерода (например, в случае пентахлордифенила-«совола»), после одного-двух пробоев может даже наблюдаться короткое замыкание электродов.

Ранее считалось, что ударная ионизация в твердых диэлектриках не может иметь места в связи с малыми значениями λ в твердых веществах. Однако современная наука о диэлектриках показывает, что и в твердом материале возможно возникновение электронных лавин, приводящих к пробоям. Эту форму пробоя твердого диэлектрика называют ч и с т о э л е к т р и ч е с к и м п р о б о е м. Предложен ряд теорий этого явления, которые позволяют получить количественное совпадение с опытными значениями электрической прочности в пределах до 20—30 %, но только для простейших случаев кристаллических решеток некоторых неорганических соединений, например щелочно-галогидных кристаллов.

Для аморфных диэлектриков, в частности органических, эти теории могут претендовать пока лишь на качественное объяснение некоторых из наблюдаемых закономерностей. Так, можно ожидать, что полярные диэлектрики должны иметь более высокую электрическую прочность, чем неполярные, так как наличие диполей или полярных групп способствует захвату электронов и затрудняет развитие пробоя. Вместе с тем при повышении температуры создаются условия для освобождения захваченных электронов; появление свободных электронов при нагревании полярного диэлектрика облегчает развитие пробоя и приводит к заметному снижению $E_{пр}$ полярных веществ с повышением температуры; у неполярных диэлектриков заметное снижение $E_{пр}$ происходит лишь при температурах, вызывающих заметное размягчение материала, т. е. приводящих к потере твердого состояния. Данные рис. 72, полученные из опыта, подтверждают высказанные здесь предположения (сплошные кривые соответствуют неполярным диэлектрикам, пунктир — полярным).

В зарубежной литературе электрический пробой иногда называют «внутренним пробоем» (intrinsic breakdown). Характерные для него высокие значения пробивной напряженности, как например на рис. 72, удается получать лишь при кратковременном воздействии напряжения, в условиях однородного поля при устране-

нии разрядов у краев электродов и для образцов диэлектриков, лишенных механических и иных дефектов. В реальных конденсаторах при кратковременном действии напряжения обычно получаются значительно меньшие величины $E_{пр}$, что объясняется как наличием дефектов в технических диэлектриках, так и усложнением явления пробоя предварительным развитием разрядов у краев обкладок или внутри диэлектрика.

С чисто электрическим пробоем в конденсаторах с твердым диэлектриком можно встретиться только в редких случаях, преимущественно при воздействии кратковременных, единичных импульсов напряжения.

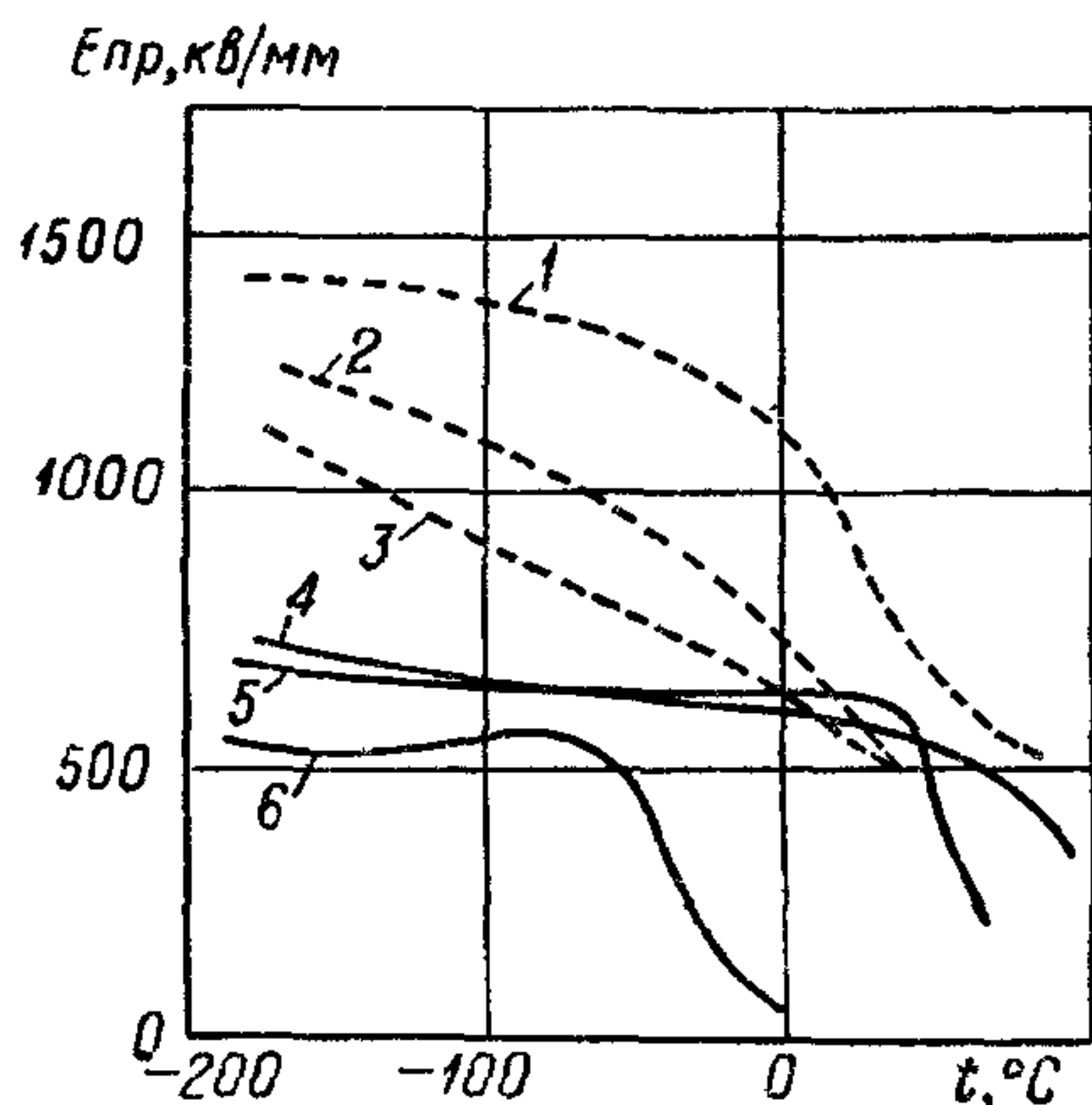


Рис. 72. Зависимость пробивной напряженности при внутреннем пробое от температуры для синтетических пленок:

1 — полиметилметакрилат; 2 — полихлорвинилацетат; 3 — хлорированный полиэтилен; 4 — полистирол; 5 — полиэтилен; 6 — полиизобутилен.

жения, являясь одной из основных причин старения конденсаторов, т. е. постепенного снижения их электрической прочности при переменном напряжении. Подробнее это явление рассмотрено ниже (§ 35).

При повышенных рабочих температурах в твердом диэлектрике конденсатора мы можем встретить еще одну форму пробоя — **т е п л о в о й п р о б о й** (теперь его часто называют также электро-тепловым пробоем). В отличие от чисто электрического пробоя при тепловом пробое проявляется весьма резкая зависимость электрической прочности от времени воздействия напряжения и от температуры окружающей среды. Сущность теплового пробоя заключается в нарушении теплового равновесия между теплом Q_1 , выделяющимся в диэлектрике, и теплом, отводимым от него в окружающую среду, Q_2 . Если выделяемое тепло Q_1 станет больше отводимого Q_2 , то возникающее при этом избыточное тепло ΔQ расходуется на повышение температуры диэлектрика. При этом растет его проводимость, что способствует дальнейшему росту Q_1 , даль-

Значительно чаще мы сталкиваемся с ионизационным пробоем твердого диэлектрика в конденсаторах, связанным с развитием разрядов в остаточных воздушных включениях в порах диэлектрика или у краев обкладок; при отсутствии воздуха разряды могут развиваться также в прослойках пропиточной или заливочной жидкости, если при изготовлении конденсатора применяется его пропитка или заливка жидким диэлектриком. Явление ионизационного пробоя может проявляться как при кратковременном, так и при длительном воздействии напря-

нейшему увеличению избыточного тепла и создает условия для неограниченного возрастания температуры. Практически дело заканчивается тепловым разрушением диэлектрика: неорганический материал плавится, а органический обугливается или сгорает.

Зависимость количества выделяемого тепла Q_1 от температуры определяется характером зависимости угла потерь от температуры (см. рис. 56, а) и величиной напряжения, приложенного к конденсатору, при заданной емкости и рабочей частоте [см. формулу (106)]. Изобразим эту зависимость на рис. 73, а в виде кривых 1, 2, 3, соответствующих трем значениям напряжения U_1 , U_2 и U_3 . Зависимость количества отводимого тепла от температуры

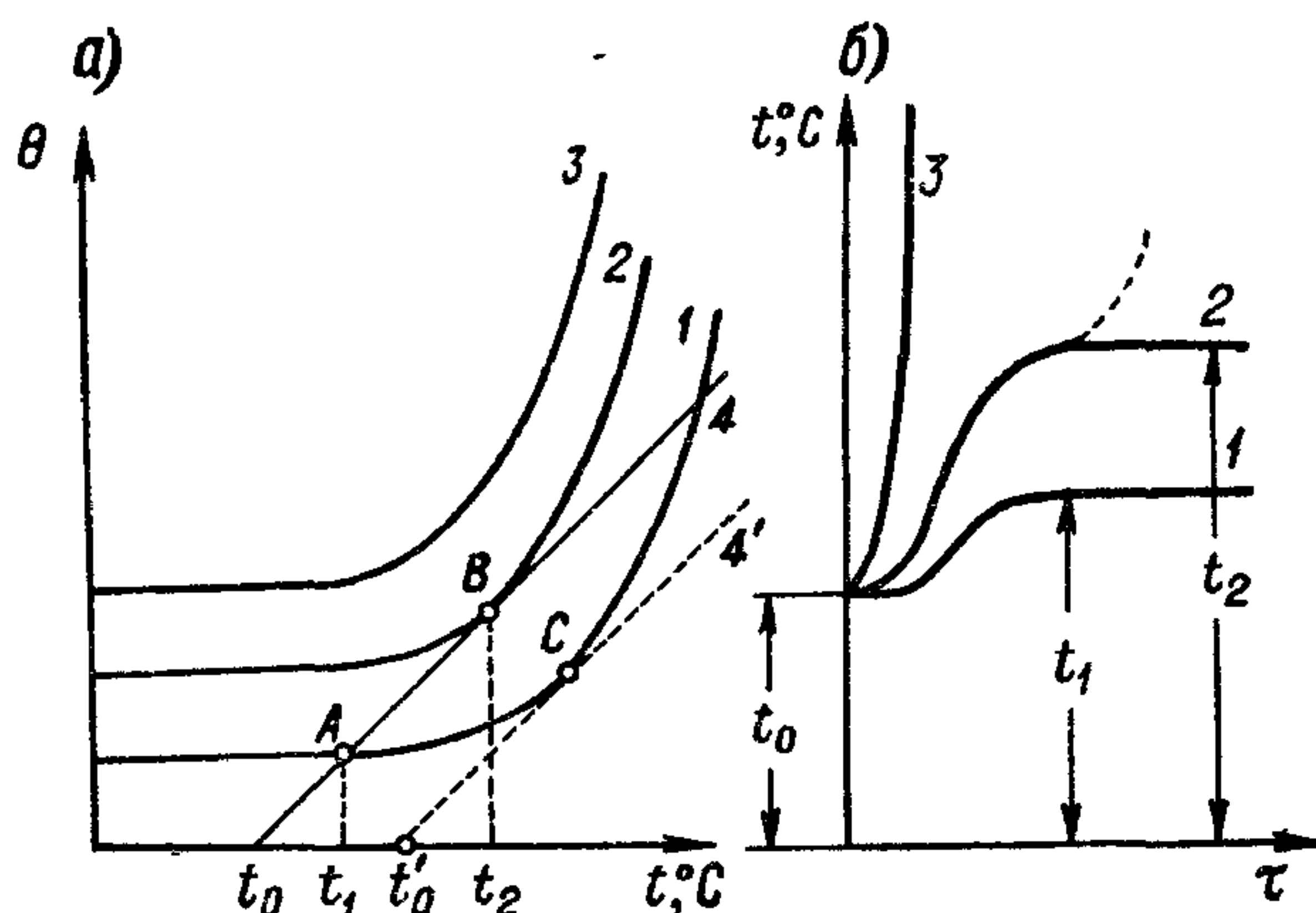


Рис. 73. К рассмотрению теории теплового пробоя.

в первом приближении можно выразить прямой линией, если принять, что коэффициент теплоотдачи не зависит от температуры [см. формулу (87)]. Изобразим эту зависимость на рис. 73, а в виде прямой 4, пересекающей кривую 1 и касающейся кривой 2. При напряжении U_1 точка пересечения A кривой 1 и прямой 4 характеризует состояние устойчивого теплового равновесия. Действительно, когда после подачи на конденсатор напряжения U_1 его температура повысится от значения t_0 до значения t_1 (см. кривую 1 на рис. 73, б), дальнейший рост температуры не может иметь места, так как за точкой A теплоотвод оказывается больше тепловыделения, что должно привести к снижению температуры до того же значения t_1 . При напряжении U_2 точка касания B кривой 2 и прямой 4 характеризует состояние неустойчивого теплового равновесия. Действительно, когда температура конденсатора поднимается до значения t_2 после подачи на него напряжения U_2 (см. кривую 2 на рис. 73, б), то достаточно небольшого превышения температуры над этим значением, чтобы вызвать дальнейшее ее нарастание, так как за точкой B тепловыделение превышает заведомо величину теплоотвода. Наконец, при напряжении U_3 кривая

тепловыделения \mathcal{Z} везде лежит выше прямой теплоотвода. При этом напряжении теплового равновесия быть не может и сразу после подачи этого напряжения на конденсатор температура последнего будет непрерывно увеличиваться (см. кривую \mathcal{Z} рис. 73, б), что приведет к термическому разрушению.

Величину напряжения U_2 , соответствующую неустойчивому тепловому равновесию, принято рассматривать в качестве напряжения теплового пробоя. Это напряжение, очевидно, зависит не только от качества диэлектрика, но в сильной степени определяется конструкцией конденсатора, в частности, условиями отдачи тепла. Современная наука о диэлектриках располагает математически оформленной теорией теплового пробоя, позволяющей с удовлетворительным приближением к опытным

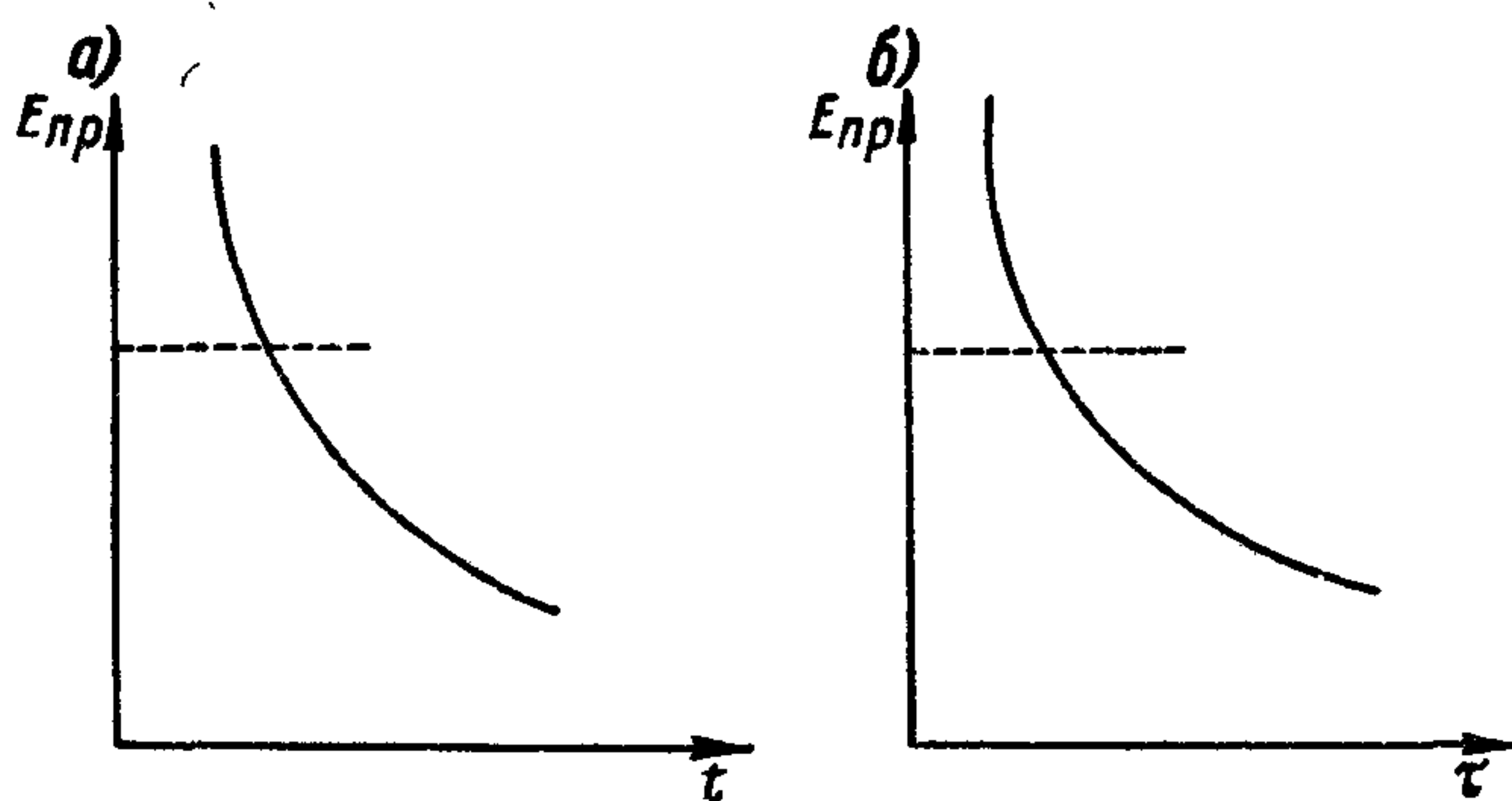


Рис. 74. Зависимость электрической прочности твердого диэлектрика от температуры (а) и от времени (б).

данным вычислять напряжение теплового пробоя для изоляционных конструкций, в том числе и для конденсаторов.

К этому вопросу мы еще вернемся ниже (§ 34), а пока отметим лишь, что явление теплового пробоя связано со временем, поскольку для того, чтобы выделилось достаточное количество избыточного тепла, способного поднять температуру диэлектрика до такого значения, при котором начинается термическое разрушение, требуется определенное время. Увеличивая напряжение, приложенное к конденсатору, мы сокращаем это время, т. е. ускоряем наступление теплового пробоя. Повышение температуры окружающей среды, например от t_0 до t'_0 , смещает прямую теплоотвода в положение 4, когда она делается касательной уже не к кривой 2, а к кривой 1, соответствующей напряжению U_1 ; это повышение окружающей температуры снижает таким образом напряжение теплового пробоя от величины U_2 до U_1 . Поэтому электрическая прочность при тепловом пробое резко зависит от температуры и времени воздействия напряжения (рис. 74).

В области низких температур и кратковременного воздействия напряжения тепловой пробой уступает свое место электрическим

формам пробоя (чисто электрическому или ионизационному), которые в этих условиях дают меньшие значения электрической прочности (пунктир на рис. 74).

При длительном воздействии постоянного напряжения в диэлектрике конденсатора могут возникать электрохимические явления, приводящие к его постепенному разрушению, заканчивающемуся пробоем. Этот вид пробоя, называемый **э л е к т р о х и м и ч е с к и м** п р о б о е м, ранее считали присущим только органическим диэлектрикам, которые отличаются пониженной химической стойкостью, но в последние годы было показано, что электрохимическое разрушение может наблюдаться и в ряде конденсаторов с твердым неорганическим диэлектриком. Примеры развития электрохимического пробоя в процессе старения различных типов конденсаторов при постоянном напряжении будут приведены в дальнейшем изложении (§ 36).

Рассматривая изменение времени воздействия напряжения в широких масштабах, мы можем представить области проявления рассмотренных здесь четырех основных форм пробоя твердых диэлектриков в виде следующей схемы:

Доли секунды	Секунды	Минуты	Часы	Десятки часов	Сотни и тысячи часов
Чисто электрический пробой		Тепловой пробой			
Ионизационный пробой					
				Электрохимический пробой	

Часто в одном и том же типе конденсатора с твердым диэлектриком, в зависимости от условий его применения, может иметь место любая из описанных здесь основных форм явления пробоя. Возможен также переход от одной формы пробоя к другой. Так например, развитие ионизационных или электрохимических явлений может привести к такому возрастанию тепловыделения в конденсаторе за счет ухудшения его электрических характеристик, которое вызовет нарушение теплового равновесия, т. е. приведет к тепловому пробую.

§ 32. Оценка электрической прочности конденсаторов

Для оценки электрической прочности конденсаторов применяют следующие значения напряжения:

$U_{пр}$ — пробивное напряжение, которое выводит конденсатор из строя при быстром испытании (обычно конденсатор доводится до пробоя в течение нескольких секунд). При определении $U_{пр}$ испытуемый конденсатор погибает, а потому подобное испытание можно производить лишь на небольшом числе образцов, обреченных на уничтожение.

$U_{ис}$ — испытательное напряжение, которое конденсатор должен выдержать, не пробиваясь, в течение определенного небольшого промежутка времени (обычно 2—5 сек, реже 1 мин), продолжительность которого строго оговаривается в ГОСТ или ТУ на данный тип конденсатора. Воздействию испытательного напряжения (испытанию «на пробой») подвергается каждый изготовляемый конденсатор, причем образцы с заведомо низкой электрической прочностью, обусловленной дефектами материала или технологии, при этом испытании выходят из строя — пробиваются.

$U_{раб}$ — рабочее напряжение, при котором конденсатор может надежно работать длительный промежуток времени. Это значение напряжения обычно указывается в маркировке конденсатора и его часто называют номинальным рабочим напряжением или просто номинальным напряжением. Длительность работы конденсатора (срок службы τ_c) должна соответствовать области его применения (см. табличку):

Область применения конденсатора	Требуемый срок службы при непрерывной работе τ_c , ч
Электроэнергетика, подводные усилители	100 000—200 000
Широковещательная аппаратура	5 000—10 000
Авиационная аппаратура	500—1000
Специальные случаи электроники	5—10

При определении пробивного напряжения для нескольких однотипных конденсаторов, изготовленных в одних и тех же условиях, особенно при относительно малой толщине диэлектрика, всегда можно наблюдать более или менее значительный разброс величин $U_{пр}$. Для характеристики качества данных конденсаторов обычно вычисляют среднее арифметическое значение $(U_{пр})_{ср}$. Величина отношения этого значения пробивного напряжения к рабочему — k_1 характеризует запас электрической прочности при работе конденсатора, а отношение $(U_{пр})_{ср}$ к испытательному напряжению — k_2 — запас электрической прочности при испытании конденсатора:

$$k_1 = \frac{(U_{пр})_{ср}}{U_{раб}}, \quad k_2 = \frac{(U_{пр})_{ср}}{U_{ис}}.$$

Более наглядное представление результата определения $U_{\text{пр}}$ можно получить, изобразив графически зависимость суммарного количества M конденсаторов, пробивающихся при заданном значении напряжения U или при любом меньшем значении, от величины напряжения (рис. 75). Число M выражается в процентах от общего количества конденсаторов испытываемой партии и представляет собой интегральную вероятность пробоя конденсаторов исследуемого типа. Кривая $M = f(U)$ помогает правильно выбрать величину испытательного напряжения $U_{\text{ис}}$, показывая, какое количество брака по пробой можно ожидать при выбранном значении испытательного напряжения. Иногда считают, что должно соблюдаться условие $U_{\text{ис}} \leq \frac{(U_{\text{пр}})_{\text{ср}}}{2}$; чаще ориен-

тируются на то, чтобы брак при воздействии испытательного напряжения не превышал нескольких процентов. На рис. 75 брак по пробой при напряжении $U_{\text{ис}}$ характеризуется отрезком OM_1 на оси ординат. Необходимо отметить, что испытание на пробой хотя и позволяет отбраковать особо дефектные конденсаторы, но не дает полной гарантии в том, что все конденсаторы, выдержавшие испытание на пробой, будут вполне надежными. При этом повышение $U_{\text{ис}}$ не только не увеличивает, а наоборот, ослабляет надежность испытанных «на пробой» конденсаторов.

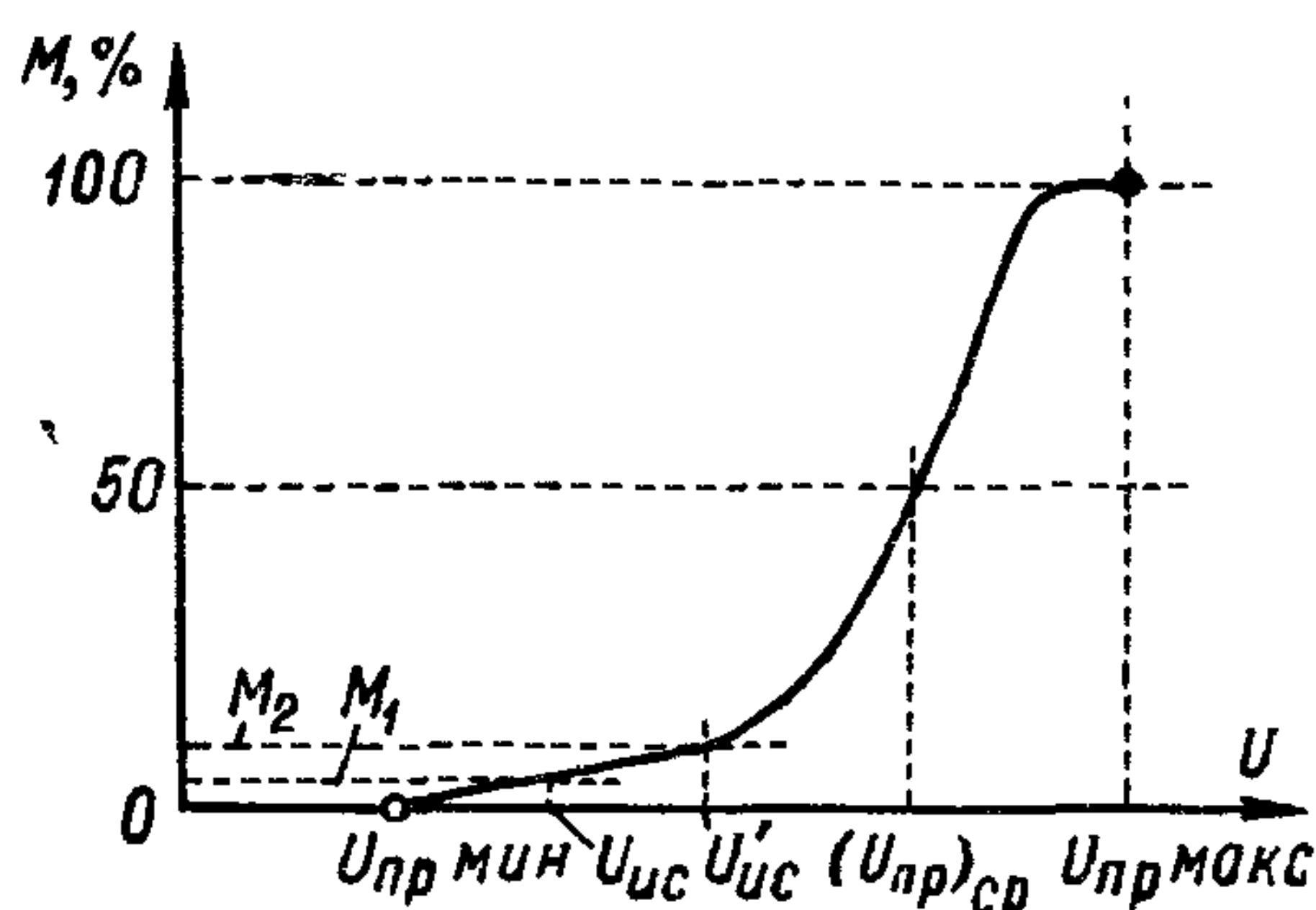


Рис. 75. Общий характер кривой разброса пробивного напряжения партии конденсаторов.

Действительно, при испытании на пробой конденсаторы подвергаются воздействию напряжения, заметно увеличенного по сравнению с рабочим, на которое они рассчитаны (обычно в 2—3 раза). Для тех конденсаторов, пробивное напряжение которых лежит ближе к значению $(U_{\text{пр}})_{\text{макс}}$, кратковременное воздействие напряжения $U_{\text{ис}}$ не должно быть особо опасным, но для тех экземпляров, у которых $U_{\text{пр}}$ близко к $U_{\text{ис}}$, даже кратковременное воздействие испытательного напряжения может дать необратимое ухудшение диэлектрика. Таким образом, при воздействии $U_{\text{ис}}$ будут пробиты заведомо дефектные экземпляры, для которых $U_{\text{пр}} < U_{\text{ис}}$; в то же время отдельные конденсаторы, имеющие $U_{\text{пр}}$ лишь немного выше $U_{\text{ис}}$, хотя и выдержат испытание, но будут при этом ухудшены так, что при последующем приложении напряжения $U_{\text{ис}}$ они пробьются или при их включении под номинальное рабочее напряжение будут иметь сниженный срок службы.

Поэтому при неоднократных испытаниях большой партии конденсаторов «на пробой» одним и тем же испытательным напряже-

нием обычно можно отбраковывать по несколько штук конденсаторов при каждом последующем испытании. Если мы увеличим $U_{ис}$ до некоторого значения $U'_{ис}$, то брак по пробое увеличится до значения OM_2 (рис. 75), но уверенность в качестве прошедших это испытание конденсаторов не увеличится, так как к тем экземплярам, которые будут иметь $U_{пр}$ лишь немного выше $U'_{ис}$, можно отнести все те же рассуждения, какие мы сделали выше, с тем различием, что увеличенное значение $U'_{ис}$ будет более опасно с точки зрения возможности повреждения диэлектрика в процессе кратковременного испытания. Такой же результат мы получим, если вместо повышения испытательного напряжения будем применять неоднократное испытание, т. е. удлинним суммарное время воздействия испытательного напряжения на испытуемые конденсаторы.

Надо иметь в виду, что испытание кратковременным воздействием повышенного напряжения не может дать уверенного представления о последующем поведении конденсатора при его длительной работе при номинальном напряжении также и потому, что механизм пробоя при кратковременном и при длительном воздействии напряжения, вообще говоря, как было показано выше, может быть различным. Таким образом, обычно «испытание на пробой» полезно прежде всего только с той точки зрения, что позволяет отбраковать заведомо дефектные экземпляры. Кроме того, величина $U_{ис}$, указанная в маркировке конденсатора или оговоренная в ГОСТ или ТУ, дает представление о порядке кратковременных перенапряжений, которые конденсатор может выдерживать в условиях эксплуатации (хотя отдельные случаи пробоя при перенапряжениях порядка $U_{ис}$ все же могут случаться, как это следует из высказанных здесь соображений).

Для конденсаторов с органическим диэлектриком, обычно заметно снижающих электрическую прочность с течением времени, применяют большие запасы электрической прочности k_1 , до 10 и даже выше, и $U_{ис} = 3U_{раб}$; для конденсаторов с газообразным и твердым неорганическим диэлектриком, в которых явление старения диэлектрика отсутствует или выражено слабее, значения $U_{пр}$, $U_{ис}$ и $U_{раб}$ сближаются. Для таких конденсаторов обычно принимают $U_{ис} = (1,5 \div 2) U_{раб}$. Такие же значения принимают и для некоторых типов конденсаторов с такими органическими пленочными диэлектриками, у которых старение ослаблено. В конденсаторах с металлизированным диэлектриком (металлобумажным, металлопленочным) в связи с их способностью к самовосстановлению при пробое значение $U_{раб}$ лежит ближе к $U_{пр}$, чем у конденсаторов с обкладками из фольги, и для них обычно принимают соотношение $U_{ис} = 1,5 U_{раб}$. Для электролитических конденсаторов испытание на пробой обычно вообще не применяют, так как оксидные слои в этих конденсаторах используются на пределе, близком к «внутренней электрической прочности». Кроме номинального рабочего напряжения, для них обычно оговаривают

в ГОСТ или ТУ так называемое п и к о в о е н а п р я ж е н и е, превышающее номинальное рабочее значение всего лишь на 10—20 %.

В зарубежной практике иногда используют также термин к а т е г о р н о е н а п р я ж е н и е (category voltage). В этом случае номинальное напряжение устанавливается для некоторой температуры, соответствующей первой (низшей) из категорий температур, для которых пригоден конденсатор. При использовании конденсатора при более высокой температуре (при высшей категории температур) допускаемое для него напряжение (категорное) должно быть соответственно снижено, что оговаривается в нормах на данный тип конденсатора. Такое снижение допускаемого напряжения при повышении температуры называют дирейтингом (derating) (§ 37).

§ 33. Кратковременная электрическая прочность конденсаторов

Кратковременная электрическая прочность конденсаторов, характеризуемая значениями $U_{пр}$ и $E_{пр}$, полученными при быстром испытании, на которую надо ориентироваться при выборе кратковременного испытательного напряжения и лишь отчасти при выборе длительно допустимого рабочего напряжения, может сильно изменяться под воздействием ряда факторов как конструктивного характера, так и вызванных внешними влияниями. Необходимо иметь в виду, что электрическая прочность, определенная на образцах диэлектрика, может существенно отличаться от тех значений, которые можно получить в конденсаторе, изготовленном из этого диэлектрика, причем последние всегда будут ниже. Прежде всего приходится сталкиваться с з а в и с и м о с т ь ю э л е к т р и ч е с к о й п р о ч н о с т и о т т о л щ и н ы д и э л е к т р и к а. При испытании образцов диэлектрика в условиях однородного поля обычно удается получать линейную зависимость $U_{пр}$ от толщины и соответственно независимость $E_{пр}$ от толщины диэлектрика (рис. 76, а). В конденсаторах чаще всего приходится иметь дело с неоднородным полем у краев обкладки, когда диэлектрик применяется в форме листов, пластинок или гладких трубок. В этом случае напряженность поля у края обкладки E_k может быть заметно повышена по сравнению со средним значением E , которое мы находим, поделив напряжение U на толщину диэлектрика d . Например, при соблюдении условия $d_{об}/d < 0,2$, где $d_{об}$ — толщина обкладки, согласно данным Бирманса, имеем:

$$E_k \approx E_{ср} \frac{d}{2d_{об}}. \quad (129)$$

Другая эмпирическая формула для вычисления E_k имеет вид

$$E_k \approx E_{ср} \sqrt{d}. \quad (130)$$

При $d_{об} = 5 \text{ мк}$ и $d = 30 \text{ мк}$ отношение $E_k/E_{ср}$ составляет 3 по формуле (129) и 5,5 по формуле (130); при толщине $d = 300 \text{ мк}$ соответственно получаем: $E_k/E_{ср}$ порядка 30 и 17,5.

Таким образом, при заданном значении толщины обкладки увеличение толщины диэлектрика приводит к заметному увеличению E_k в сравнении с $E_{ср}$. Если предположить, что пробой у края обкладки происходит при значении E_k , равном пробивной напряженности при однородном поле, то наблюдаемое при пробое значение $E_{ср}$ будет заметно снижено; при увеличении толщины диэлектрика пробой у края электрода произойдет примерно при том же значении E_k , но величина $E_{ср}$ будет еще ниже, так как искажение поля

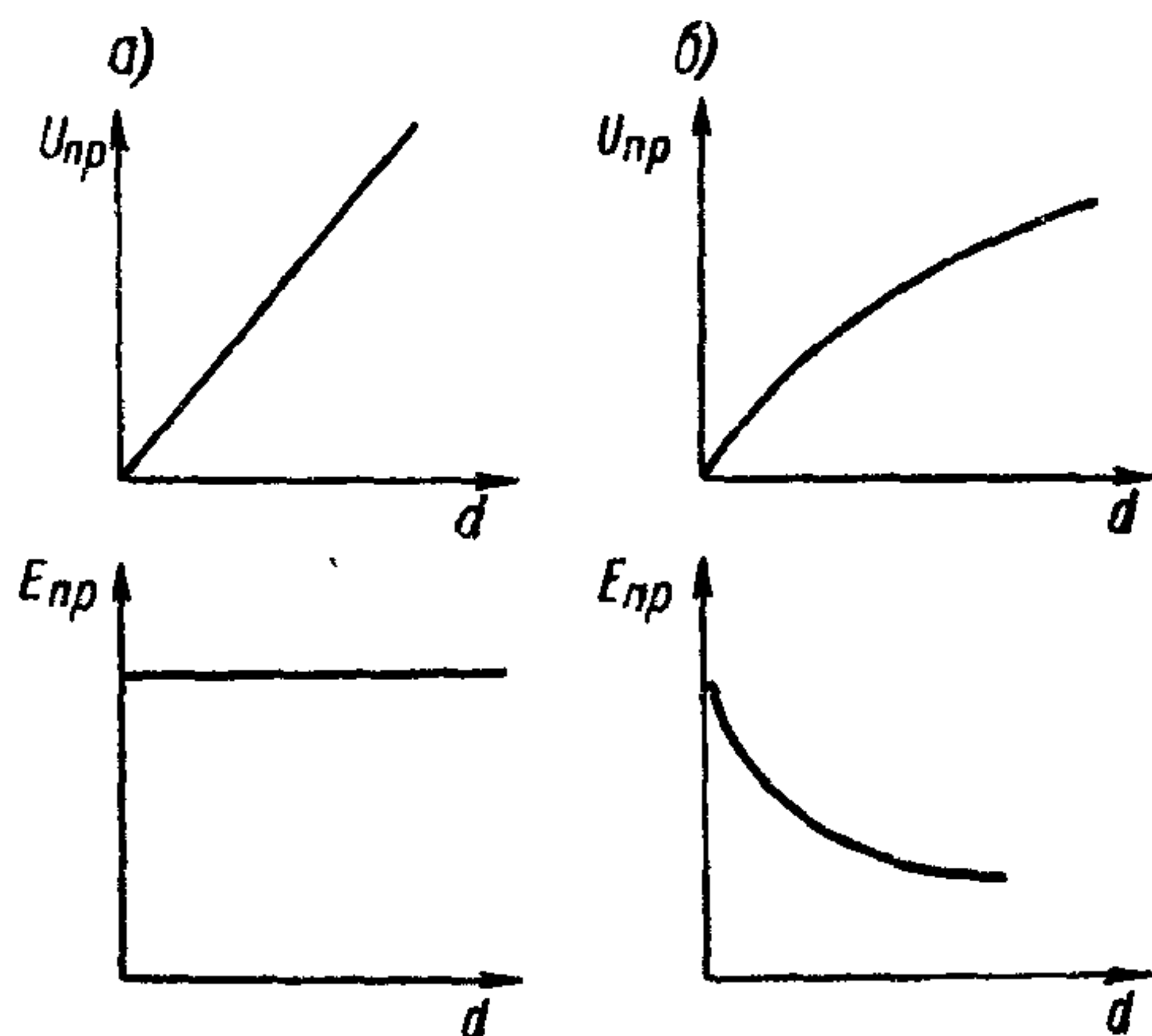


Рис. 76. Зависимость пробивного напряжения и пробивной напряженности твердого диэлектрика от толщины: а — однородное поле; б — неоднородное поле.

усилится и различие в значениях E_k и $E_{ср}$ будет еще больше. Таким образом, значение $E_{пр}$, о котором мы судим по величине $E_{ср} = U_{пр}/d$ в момент пробоя, будет падать с ростом толщины, а пробивное напряжение, хотя и будет расти, но замедленно (рис. 76, б).

С точки зрения повышения кратковременной электрической прочности конденсатора, выгоднее снижать толщину диэлектрика между обкладками, применяя ряд секций с тонким диэлектриком, соединенных последовательно, чтобы обеспечить нужную величину рабочего

напряжения. Однако при снижении толщины диэлектрика до очень малых значений возникает опасность появления в нем слабых мест — участков с резко сниженной электрической прочностью. При толщине диэлектрика порядка нескольких микрон попадание в него металлической или угольной пылинки может уже создать сквозное короткое замыкание. Слабыми местами могут также являться сквозные отверстия в тонком диэлектрике. Наличие слабых мест мало заметно при испытании образцов диэлектрика малой площади, особенно при небольшом числе испытываемых образцов, но в конденсаторах при большой площади обкладок оказывается весьма опасным.

При использовании обкладок из фольги при малых толщинах диэлектрика обычно оказывается практически невозможным использовать диэлектрик в один слой, так как вероятность попадания проводящей частицы или грубого дефекта структуры между обкладками делается недопустимо большой. В этом случае применяют не менее двух слоев диэлектрика между обкладками, а при

большой площади обкладок (большой емкости) и необходимости обеспечить повышенную надежность конденсатора — не менее трех слоев. Таким образом, при диэлектрике, составленном из тонких слоев, увеличение числа слоев, т. е. увеличение толщины диэлектрика, должно давать повышение электрической прочности.

Упрощенно¹ это можно пояснить следующим образом. Представим себе слоистый диэлектрик из n слоев с толщиной отдельного слоя d_1 (рис. 77, а); предположим, что в одном из слоев имеется «слабое место», образованное проводящей частицей толщиной x ; обозначим отношение $\frac{x}{d_1} = a$; пренебрегаем искажением поля возле частицы и считаем, что ее величина скажется только на снижении общей рабочей толщины изоляции. Предположим, что электрическая прочность здоровых слоев диэлектрика будет E_H ; тогда пробивное напряжение изоляции с одним поврежденным слоем будет:

$$U_{пр} = E_H \{d_1 (n - 1) + (d_1 - ad_1)\} = E_H (n - a) d_1.$$

Среднее значение пробивной напряженности мы находим, разделив пробивное напряжение на общую толщину изоляции nd_1 . Получаем:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{nd_1} = \frac{E_H (n - a) d_1}{nd_1} = E_H \left(1 - \frac{a}{n}\right). \quad (131)$$

Выражение (131) показывает, что с увеличением числа слоев средняя пробивная напряженность будет возрастать, приближаясь к значению E_H . Однако, как было показано выше, величина E_H при неоднородном поле должна снижаться с ростом толщины за счет искажения поля у краев обкладок. Поэтому рост электрической прочности слоистого диэлектрика с увеличением числа слоев (с увеличением суммарной толщины) будет происходить только до некоторого критического значения $n_{кр}$; далее начнется снижение $E_{пр}$ (рис. 77, б). Величина $n_{кр}$ зависит от толщины отдельных слоев d_1 и от площади обкладок конденсатора.

Таким образом, для получения максимальной величины $E_{пр}$ следует брать оптимальное число слоев $n_{кр}$. Это можно осуществить в конденсаторах высокого напряжения, собирая их из последовательно соединяемых секций с таким расчетом, чтобы

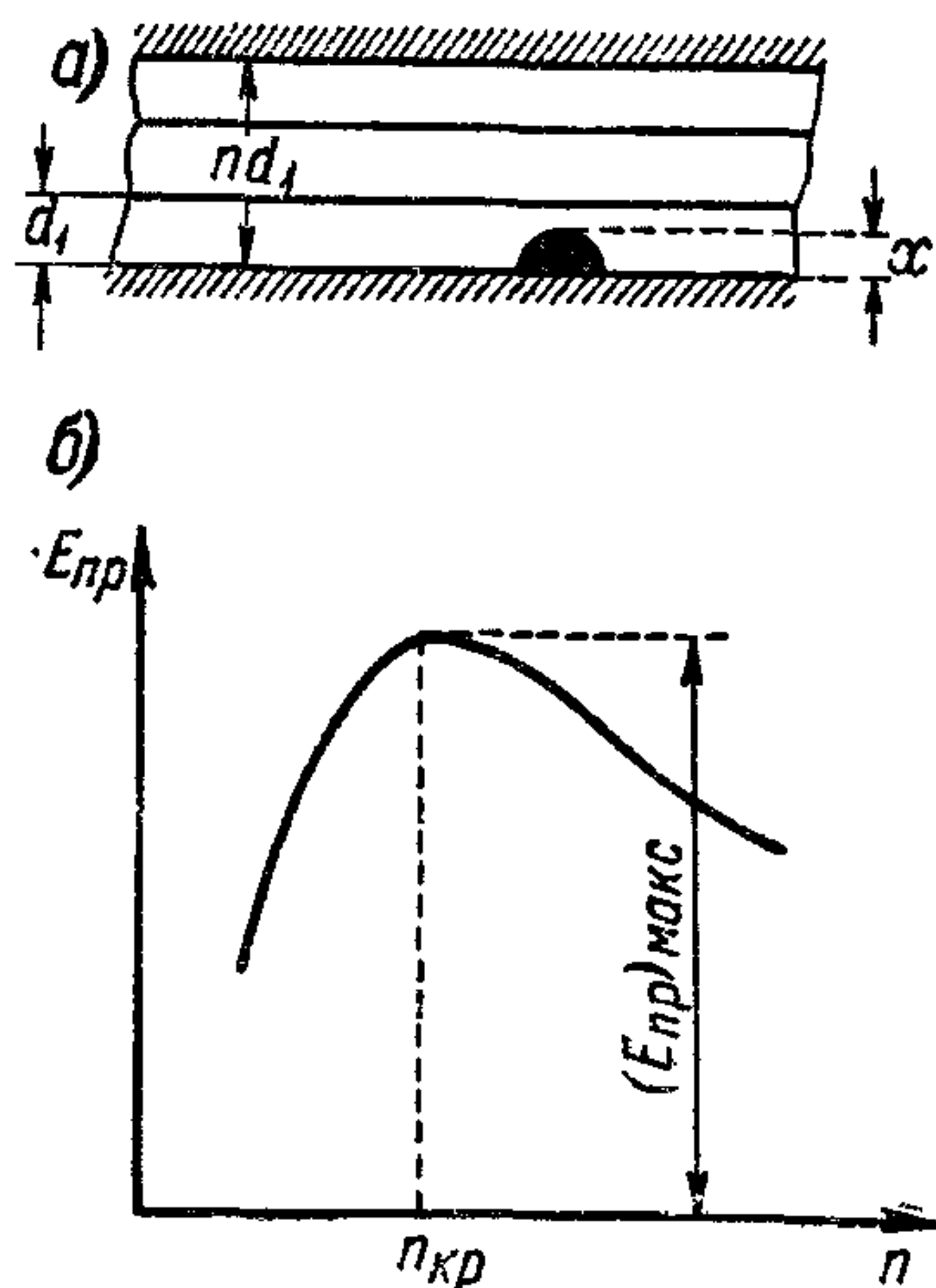


Рис. 77. Зависимость пробивной напряженности слоистого диэлектрика от числа слоев.

¹ Подробнее, см. W. Held, R. Klahn. — «ETZ-A», 1966, 87, № 4, с. 121—126.

толщина диэлектрика в каждой секции была оптимальной, т. е. обеспечивала бы наивысшее значение $E_{\text{пр}}$.

При низких рабочих напряжениях приходится отклоняться от оптимального значения $n_{\text{кр}}$ и применять диэлектрик, составленный всего из трех или даже из двух слоев; при этом $E_{\text{пр}}$ снижается и для сохранения нужного запаса электрической прочности приходится снижать величину $E_{\text{раб}}$ по сравнению с конденсаторами высокого напряжения. Переход от применения фольговых обкладок к металлизации диэлектрика, обеспечивающий свойство самовосстановления при пробое (§ 22), позволяет использовать тонкий диэлектрик в один слой и оказывается особенно выгодным при изготовлении конденсаторов низкого напряжения.

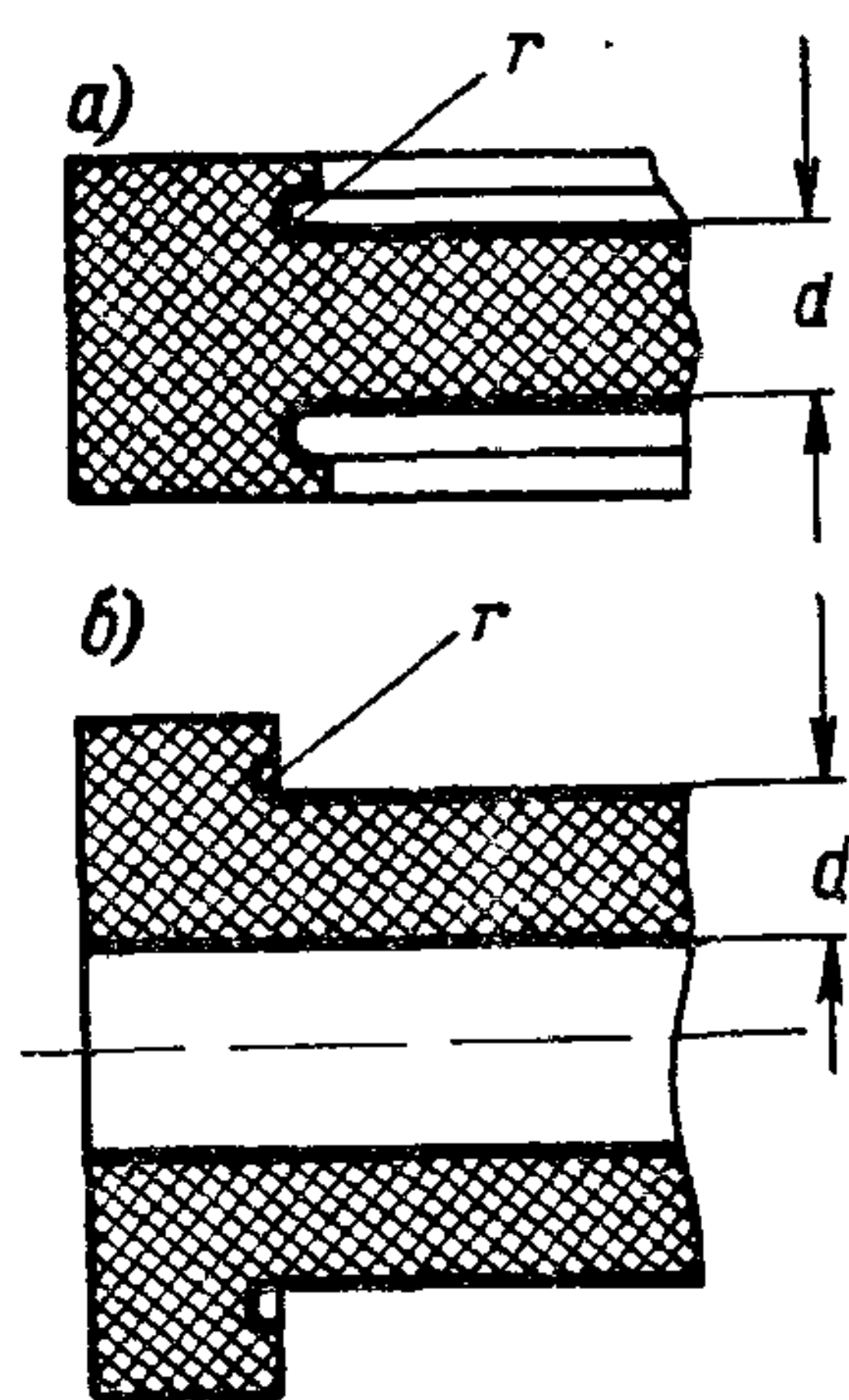


Рис. 78. Выравнивание электрического поля у краев обкладок в керамических конденсаторах: а — дисковый (плоский) конденсатор; б — трубчатый конденсатор (цилиндрический).

Появление нового типа механически и электрически прочной и однородной синтетической пленки из полиэтилентерефталата, не содержащей практически грубых структурных дефектов, даже при малых толщинах, порядка 8—10 мкм, позволило использовать такую пленку в один слой при обкладках из металлической фольги. Однако в этом случае значение $E_{\text{раб}}$ приходится заметно снижать в сравнении с металлизированным диэлектриком или диэлектриком, составленным из нескольких слоев. Кроме того, для обеспечения достаточно высокого выхода годных конденсаторов, необходимо вести их намотку в обеспыленном помещении, чтобы исключить попадание пыли в конденсатор за счет притяжения ее наэлектризованной при намотке пленкой.

Сделанное выше замечание о необходимости секционирования при изготовлении конденсаторов высокого напряжения не относится к таким диэлектрикам, в которых можно изменять толщину материала у краев обкладок, обеспечивая выравнивание электрического поля и устраняя или резко ослабляя зависимость $E_{\text{пр}}$ от толщины диэлектрика в области больших толщин (рис. 78). Среди широко применяемых конденсаторных диэлектриков таким преимуществом обладает керамика, в связи с чем керамические конденсаторы можно изготовлять на испытательные напряжения порядка десятков киловольт, не прибегая к помощи секционирования.

Увеличение площади обкладок вызывает снижение кратковременной прочности конденсаторов, особенно при малых толщинах диэлектрика, за счет увеличения вероятности попадания между обкладками слабых мест с особо пониженной

величиной пробивного напряжения. При этом с увеличением площади обкладок кривые, изображающие дифференциальную p_k и интегральную φ_k функции распределения образцов по их пробивным напряжениям, смещаются в сторону меньших напряжений (рис. 79). При этом уменьшается как среднее значение $U_{пр}$, примерно соответствующее интегральной вероятности пробоя 50%, так и минимальное значение. Как уже указывалось выше, кривые интегральной вероятности пробоя строят суммируя число образцов, пробивающихся при заданном значении напряжения и при любом меньшем. Для построения дифференциальной кривой полученный интервал пробивных напряжений разделяется на равные участки и для каждого участка подсчитывается число пробитых

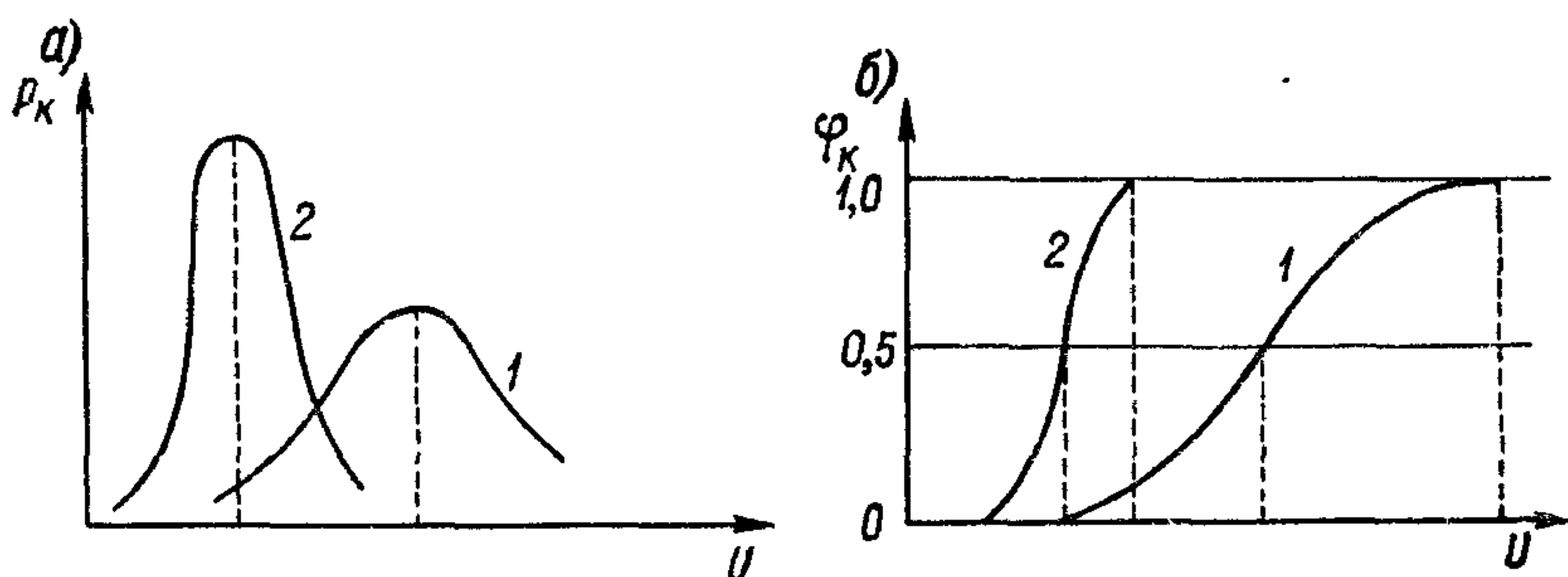


Рис. 79. Функции распределения образцов по их пробивным напряжениям: а — дифференциальная функция; б — интегральная функция,

1 — малая площадь обкладок; 2 — большая площадь обкладок.

образцов, выражаемое в процентах от общего числа пробитых образцов. Если дифференциальные кривые оказываются симметричными (рис. 79, а) и подчиняются нормальному закону распределения (закону Гаусса), то по результатам испытания образцов малой площади, пользуясь методами математической статистики, можно построить кривые распределения пробивных напряжений для образцов большой площади и вычислить для них среднее значение пробивного напряжения¹. Такой случай мы обычно имеем при испытании высоковольтных конденсаторов с диэлектриком достаточной толщины (многослойным). При этом, если при площади обкладок S_0 интегральная вероятность пробоя равна φ_{k0} , то при площади $S_1 = nS_0$ вероятность пробоя возрастает до $\varphi_{k1} = \varphi_{k0}^n$.

В случае конденсаторов низкого напряжения с тонким диэлектриком, например из 2—3 слоев, дифференциальная кривая распределения пробивных напряжений обычно оказывается несимметричной и упомянутый выше метод пересчета электрической прочности с малой на большую площадь обкладок (с образцов

¹ См., например, Н. А. Козырев. Изоляция электрических машин и методы ее испытания. ГЭИ, 1962, с. 240.

малой емкости к образцам большой емкости) оказывается непригодным. Опытное изучение характера зависимости $E_{\text{пр}}$ от площади обкладок для конденсаторов низкого напряжения приводит к эмпирической формуле

$$E_{\text{пр}} = A - B \lg S. \quad (132)$$

В этой формуле коэффициент A представляет собой значение электрической прочности при площади обкладок, равной единице, а коэффициент B характеризует наклон прямой $E_{\text{пр}} = f(\lg S)$. При испытании двух- и трехслойных бумажно-вазелиновых конденсаторов в СССР и аналогичных бумажно-масляных в Англии были получены следующие значения коэффициентов A и B :

Диэлектрик $2 \times 8 \text{ мк}$		Диэлектрик $3 \times 8 \text{ мк}$		Источник данных
A	B	A	B	
322	56	410	58	Ренне (СССР) Герлинг (Англия)
238	44	325	48	

Здесь $E_{\text{пр}}$ выражено в кв/мм и S — в см^2 . Можно полагать, что зависимость, выраженная формулой (132), свойственна не только бумажным конденсаторам, но распространяется и на другие типы конденсаторов с тонким диэлектриком; очевидно, что при этом значения коэффициентов A и B изменяются в соответствии с изменением типа диэлектрика.

Из выражения (132) вытекает, что при $\lg S = A/B$ величина $E_{\text{пр}}$ равна нулю, т. е. обкладки при таком значении емкости должны быть замкнуты накоротко. В случае двух слоев тонкого диэлектрика это вполне возможно, так как легко себе представить возможность совпадения двух проводящих включений в обоих слоях бумаги, если площадь обкладок достаточно велика; при трех слоях вероятность совпадения таких включений во всех трех слоях весьма мала. Поэтому можно думать, что при увеличенном числе слоев и диэлектрике повышенной толщины зависимость $E_{\text{пр}} = f(S)$ должна отклоняться от выражения (132) при увеличении S с переходом к установившейся величине при больших значениях площади.

Зависимость электрической прочности от площади обкладок наблюдается и в случае конденсаторов с жидким диэлектриком (рис. 80) и даже при газообразном диэлектрике. Тогда эта зависимость связана, очевидно, уже не со «слабыми местами» в диэлектрике, как в случае твердых материалов, а с увеличением вероятности появления неровностей на краях и на поверхности обкладок, приводящих к локальному искажению электрического поля и увеличивающих вероятность пробоя жидкости или газа в местах этих неровностей.

При заданном значении толщины диэлектрика (и его ϵ) величина площади обкладок S пропорциональна емкости конденсатора C , а потому зависимость пробивной напряженности от емкости также должна следовать закономерности, выражаемой формулой (132) (рис. 81). В связи с этим конденсаторы большой емкости выгодно разбивать на ряд параллельно соединяемых секций с тем, чтобы повысить среднее значение $E_{пр}$ для каждой секции, уменьшить брак при испытании секций на пробой, а также повысить надежность конденсатора.

В случае конденсаторов переменного напряжения большой реактивной мощности, работающих при низкой частоте, емкость

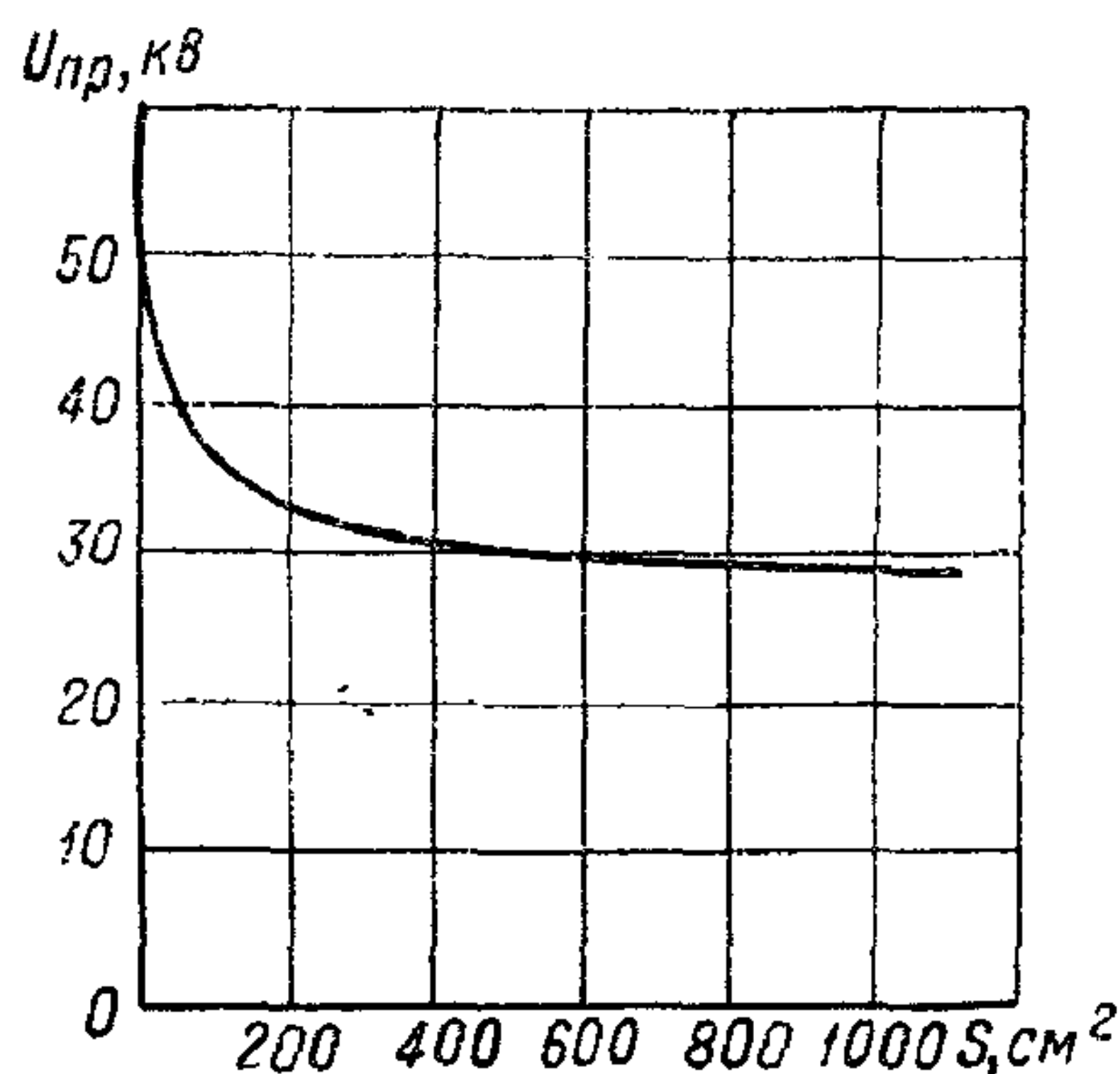


Рис. 80. Зависимость пробивного напряжения маслонаполненного конденсатора от площади обкладок.

конденсатора может быть велика, порядка сотен микрофарад, и его иногда приходится собирать из 100 и даже более параллельно соединяемых сек-

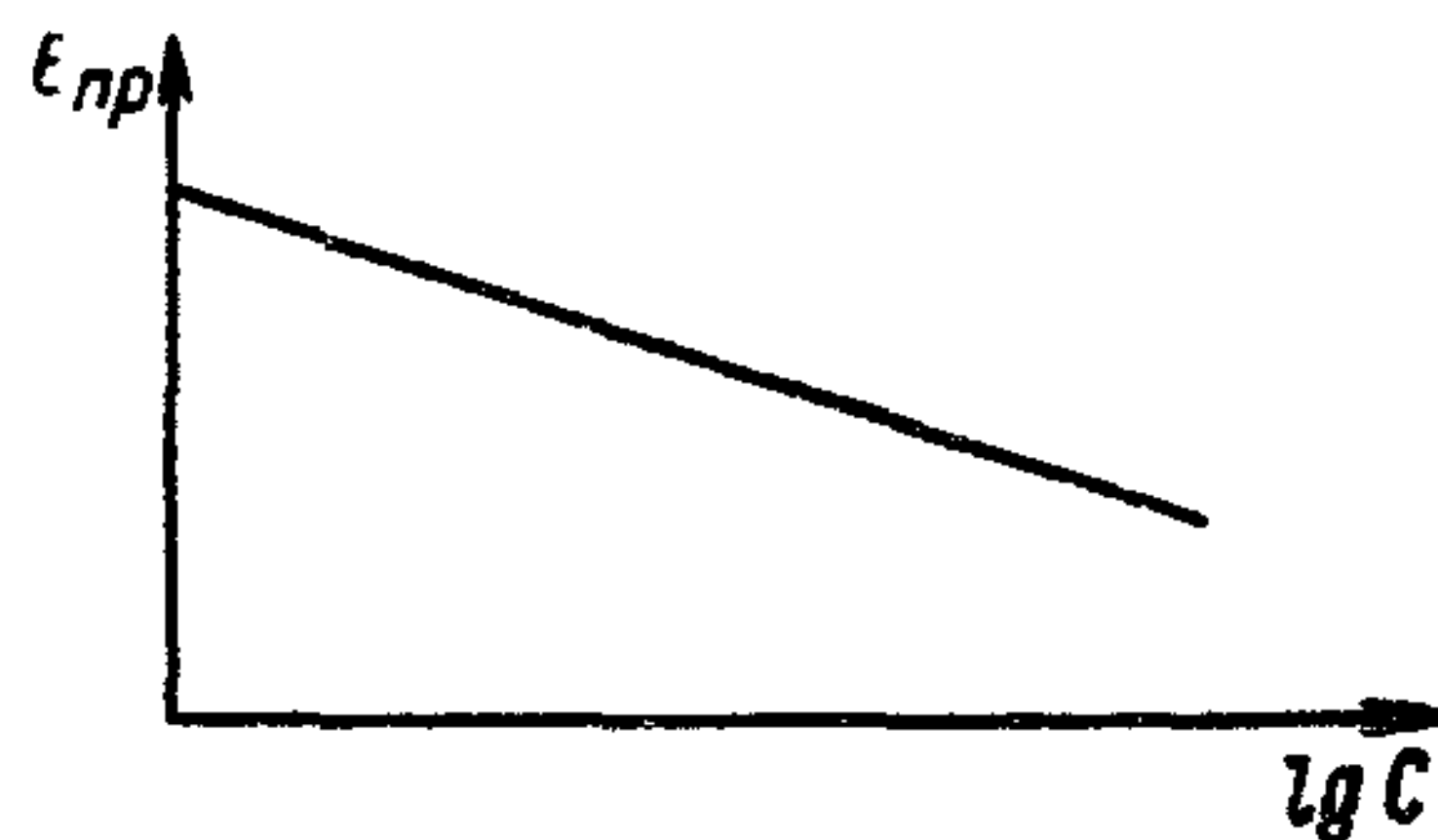


Рис. 81. Общий характер зависимости электрической прочности конденсатора с тонким диэлектриком от емкости.

ций. Для повышения надежности таких конденсаторов применяется индивидуальная защита секций плавкими предохранителями, встроенными внутрь конденсатора. При пробое отдельных секций они отключаются предохранителями, не нарушая работы конденсатора. Эта же идея применяется при изготовлении больших импульсных конденсаторов с высокой удельной энергией, где применение большого числа параллельно соединенных секций дает дополнительное преимущество — возможность снижения индуктивности, что для подобных конденсаторов весьма важно.

Повышение температуры окружающей среды в большинстве случаев относительно мало влияет на кратковременную электрическую прочность конденсатора, если мы находимся в таких пределах температуры, когда не происходит резких физических изменений диэлектрика и когда самому диэлектрику не свойственна резкая зависимость $E_{пр}$ от температуры (рис. 72). Некоторого снижения электрической прочности при сильном охлаждении можно ожидать для случая конденсаторов, пропитанных и залитых жидким диэлектриком, особенно при по-

вышенной вязкости последнего и относительно высокой температуре застывания. В области низких температур застывание жидкости и сокращение ее объема приводит к возникновению пустот в изоляции и к ухудшению электрической прочности конденсатора.

Повышение частоты приложенного напряжения оказывает большое влияние на величину кратковременной электрической прочности конденсаторов. Для конденсаторов с газообразным диэлектриком пробивное напряжение снижается в области частот до нескольких мегагерц, а при дальнейшем росте частоты, когда период изменения напряжения становится соизмеримым со временем развития пробоя газа (10^{-7} сек), пробив-

ное напряжение возрастает с частотой (рис. 82).

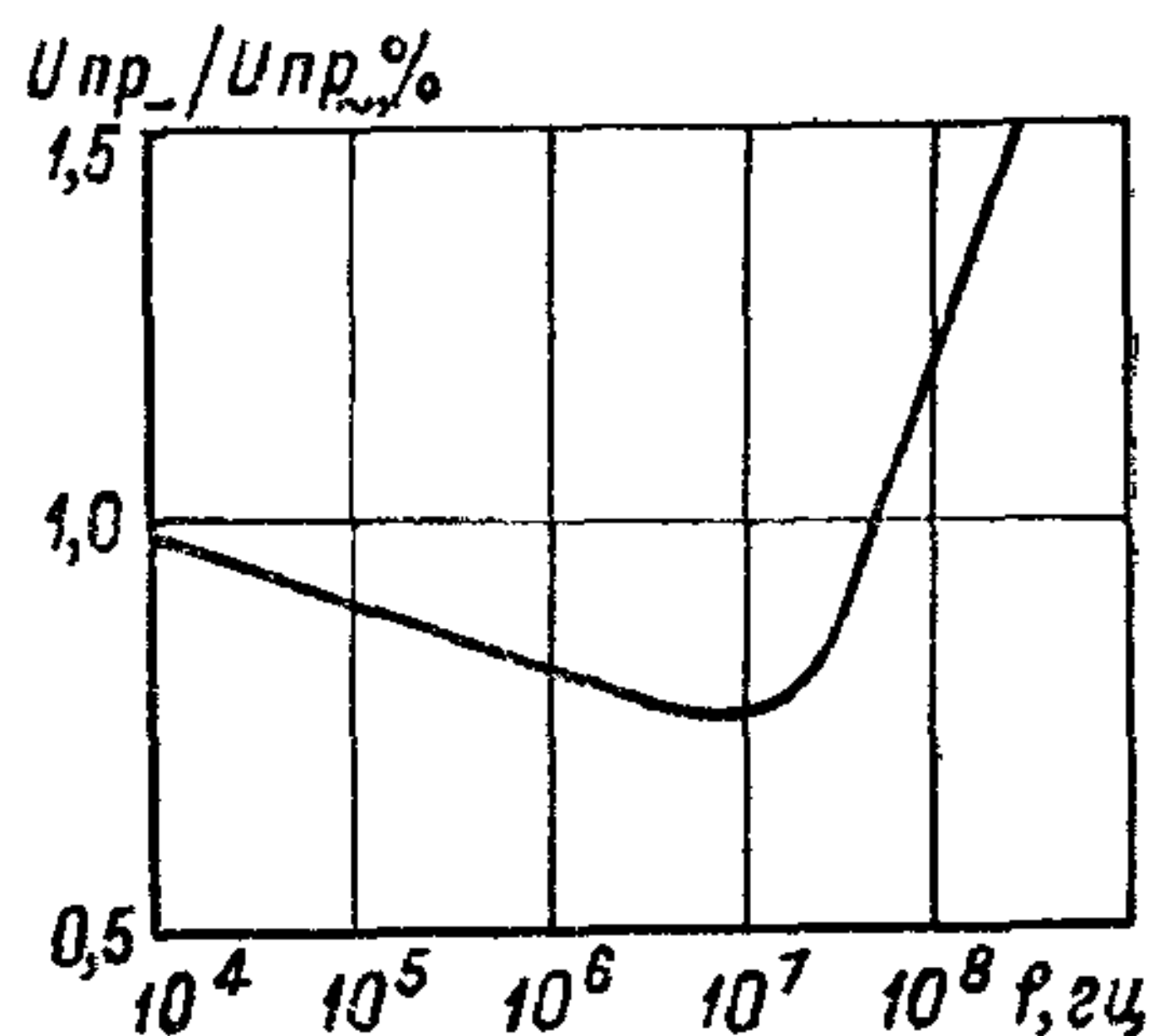


Рис. 82. Зависимость пробивного напряжения воздушного конденсатора от частоты.

Конденсаторы с жидким диэлектриком заметно снижают $E_{пр}$ с ростом частоты; так, в случае нефтяного масла переход от частоты 50 гц к частоте 500 кгц дает снижение электрической прочности на 40%. В случае газов и жидкостей амплитудное значение $E_{пр}$ при частоте 50 гц обычно равно значению $E_{пр}$ при постоянном напряжении (действующее значение в $\sqrt{2}$ раз меньше).

Для конденсаторов с твердым диэлектриком переход от постоянного напряжения к переменному низкой частоты может давать более сильное снижение: часто действующее значение $E_{пр}$ оказывается в 2 раза меньше, чем при постоянном напряжении. Для конденсаторов с органическим диэлектриком переход от частоты 50 гц к частоте 1—10 кгц дает снижение $E_{пр}$ до 3 раз; для конденсаторов с неорганическим диэлектриком в этой области частот повышение частоты обычно оказывает малое влияние; при переходе от частот порядка 1—10 кгц к частотам порядка 1—10 Мгц и для таких конденсаторов может наблюдаться снижение $E_{пр}$ до 2—2,5 раз.

Заметное влияние частоты на кратковременную электрическую прочность конденсаторов связано с тем, что механизм пробоя при кратковременном воздействии напряжения обычно носит ионизационный характер, а с увеличением частоты интенсивность ионизации и ее разрушающее действие на диэлектрик возрастают.

§ 34. Тепловой пробой

Выше мы уже привели общие сведения о тепловой форме пробоя диэлектриков (§ 31). Этот вид пробоя в 20—30-х годах этого столетия имел сравнительно широкое развитие, что и потребовало его серьезного изучения. Разработка метода расчета электрической

прочности при тепловом пробое и улучшение качества изоляции привело к тому, что для применявшегося ранее обычного верхнего предела рабочих температур диэлектрика в конденсаторах для электронной техники и для электроэнергетики, составляющего $60-70^{\circ}\text{C}$, тепловой пробой удалось практически исключить. В связи с этим пропал интерес и к расчету электрической прочности при тепловом пробое.

В настоящее время, когда верхний предел рабочей температуры конденсаторов во многих случаях поднят до $100-125^{\circ}\text{C}$, а иногда достигает $200-300^{\circ}\text{C}$ и даже $500-600^{\circ}\text{C}$ расчет конденсатора на отсутствие теплового пробоя приобретает новую актуальность. Теория теплового пробоя, разработанная В. А. Фоком и другими советскими учеными, в ряде случаев может быть использована для технических расчетов конденсаторов, работающих при повышенных температурах.

Формулы для вычисления пробивного напряжения при тепловом пробое получены для двух основных случаев: плоского конденсатора с обкладками неограниченных размеров (при направлении движения теплового потока перпендикулярно обкладкам) и цилиндрического конденсатора бесконечной длины (при радиальном направлении теплового потока в сторону наружной обкладки). Чем ближе подходит реальный конденсатор к одному из этих идеальных случаев, тем большее приближение дает расчет по приведенным ниже формулам к результатам опыта.

Для плоского конденсатора пробивное напряжение при тепловом пробое может быть выражено формулой

$$U_{\text{пр}} = \Phi(c) \sqrt{\frac{33,6\lambda}{a\gamma_0}}, \quad (133)$$

где λ — коэффициент теплопроводности диэлектрика конденсатора в $\text{кал/сек} \cdot \text{см} \cdot \text{град}$; γ_0 — активная проводимость диэлектрика при температуре окружающей среды в $\text{ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$; a — температурный коэффициент активной проводимости диэлектрика, представляющий собой коэффициент в показателе степени в формуле

$$\gamma = \gamma_0 e^{a(T - T_0)}, \quad (134)$$

изображающей зависимость активной проводимости от температуры; $\Phi(c)$ — функция параметра c , характеризующего влияние геометрических размеров конденсатора и условий его охлаждения на величину пробивного напряжения:

$$c = \frac{\lambda_э \alpha_T d}{2\lambda (\lambda_э + \alpha_T d_э)}, \quad (135)$$

где $\lambda_э$ — коэффициент теплопроводности материала электродов в $\text{кал/сек} \cdot \text{см} \cdot \text{град}$; α_T — коэффициент теплоотдачи в $\text{кал/сек} \cdot \text{см}^2 \times \text{град}$; d — толщина диэлектрика в см ; $d_э$ — толщина электрода (обкладки) в см .

При постоянном напряжении активная проводимость диэлектрика представляет собой величину, обратную значению удельного объемного сопротивления диэлектрика ρ .

В этом случае пробивная напряженность при тепловом пробое будет равна:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{d} = 5,8 \frac{\varphi(c)}{d} \sqrt{\frac{\lambda \rho_0}{a}}. \tag{136}$$

Значение ρ_0 можно найти по величине постоянной времени конденсатора RC , используя формулу (53) (§ 10):

$$\rho_0 = \frac{RC}{0,884\varepsilon} \cdot 10^{13} \text{ [ом} \cdot \text{см]}, \tag{137}$$

где ε — электрическая проницаемость диэлектрика и RC выражена в *Мом* · *мкф* или в *сек*.

Значение RC , подставляемое в формулу (137), должно соответствовать температуре окружающей среды, принятой при расчете, и напряжению, близкому по величине к ожидаемому напряжению теплового пробоя.

Таблица 3

Значения коэффициента теплопроводности некоторых диэлектриков

Наименование диэлектрика	Коэффициент теплопроводности, $\lambda \times 10^4$	
	<i>вт/см · град</i>	<i>кал/сек · см · град</i>
Полистирол	8	1,9
Полихлорвинил	9	2,2
Битум нефтяной (температура размягчения 100° С)	10	2,4
Пентахлордифенил («совол»)	10	2,4
Масло нефтяное (конденсаторное)	12,5—13	3—3,1
Битум нефтяной (температура размягчения 125° С)	14	3,4
Полиэтилентерефталат	15	3,6
Полисилоксан, жидкий	15,4	3,7
Бумага пропитанная	21	5
Полиметилметакрилат	16—25	4—6
Пластмасса типа фенопласт	18	4,3
Парафин	25	6
Фторопласт-4	25	6
Слюда, перпендикулярно слоям	35—40	8,5—10
Битум (100° С) 25%, песок 75%	55	13
Битум (125° С) 25%, песок 75%	70—75	17—18
Эмаль силикатная	85—130	20—30
Фарфор изоляторный	100	24
Кварц	150	36
Радиостеатит	200	48
Тиконд	300	72
Термоконд	350—400	84—96
Ультрафарфор	500	144
Алюминоксид	1500	360

Значение коэффициента a можно найти, зная величину коэффициента β , входящего в формулу (57) (§ 11), обычно используемую для выражения зависимости постоянной времени конденсаторов от температуры:

$$a = \frac{\beta}{\lg e} = 2,3\beta. \tag{138}$$

Значения коэффициента теплопроводности обычно выражаются на практике в *вт/см·град*; для того чтобы получить значение в *кал/сек·см·град*, которое надо подставлять в формулы (135) и (136), следует численное значение λ , выраженное в *вт/см·град*, умножить на переводной коэффициент, равный 0,24.

Значения λ для ряда диэлектриков, применяемых в производстве конденсаторов, приведены в табл. 3.

Величину коэффициента теплоотдачи α_T для ориентировочных расчетов можно принять равной: $\alpha_T \approx 3 \cdot 10^{-4}$ *кал/сек·см²·град*. Более точное определение значения α_T дано ниже (§ 47). Если значение α_T получено в *вт/см²·град*, то его также надо умножить на 0,24, чтобы перевести в единицы, соответствующие формуле (135). Вычислив по формуле (135) значение параметра c , соответствующие значения $\varphi(c)$ можно найти по табл. 4.

Таблица 4

Значения функции $\varphi(c)$ при разных значениях параметра c

c	$\varphi(c)$	c	$\varphi(c)$	c	$\varphi(c)$	c	$\varphi(c)$	c	$\varphi(c)$	c	$\varphi(c)$
0,010	0,040	0,045	0,090	0,10	0,13	0,45	0,27	1,0	0,37	4,5	0,55
0,015	0,050	0,050	0,095	0,15	0,16	0,50	0,28	1,5	0,43	5,0	0,56
0,020	0,065	0,055	0,100	0,20	0,18	0,55	0,29	2,0	0,46	5,5	0,565
0,025	0,070	0,060	0,103	0,25	0,20	0,60	0,31	2,5	0,48	6,0	0,57
0,030	0,075	0,070	0,110	0,30	0,22	0,70	0,32	3,0	0,51	7,0	0,58
0,036	0,080	0,080	0,118	0,35	0,24	0,80	0,34	3,5	0,52	8,0	0,59
0,040	0,085	0,090	0,123	0,40	0,26	0,90	0,36	4,0	0,54	9,0	0,60

При переменном напряжении активная проводимость может быть выражена формулой

$$\gamma = \frac{\varepsilon f \operatorname{tg} \delta}{1,8 \cdot 10^{12}}, \tag{139}$$

где f — частота в *гц* и $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла потерь диэлектрика. В этом случае пробивная напряженность при тепловом пробое будет равна:

$$E_{\text{пр}} = 7,78 \cdot 10^6 \frac{\varphi(c)}{d} \sqrt{\frac{\lambda}{a f \varepsilon \operatorname{tg} \delta_0}}. \tag{140}$$

Если зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры, как обычно, выражена формулой

$$\lg \operatorname{tg} \delta = A + a_1 (t - t_1), \tag{141}$$

то значение a , входящее в формулу (140), можно принять: $a = 2,3 a_1$.

Величина $\operatorname{tg} \delta_0$, которую надо подставлять в эту формулу, представляет собой значение тангенса угла потерь диэлектрика при температуре окружающей среды t_0 , для которой производится вычисление $E_{\text{пр}}$ при тепловом пробое. Это вычисление имеет смысл проводить только в том случае, когда t_0 больше температуры t_1 , при которой начинается возрастание $\operatorname{tg} \delta$ с температурой (рис. 56).

Обычно на пути теплового потока от конденсаторной секции к наружной поверхности конденсатора имеется тепловое сопротивление в виде слоя изоляции от корпуса, слоя заливочной мас-

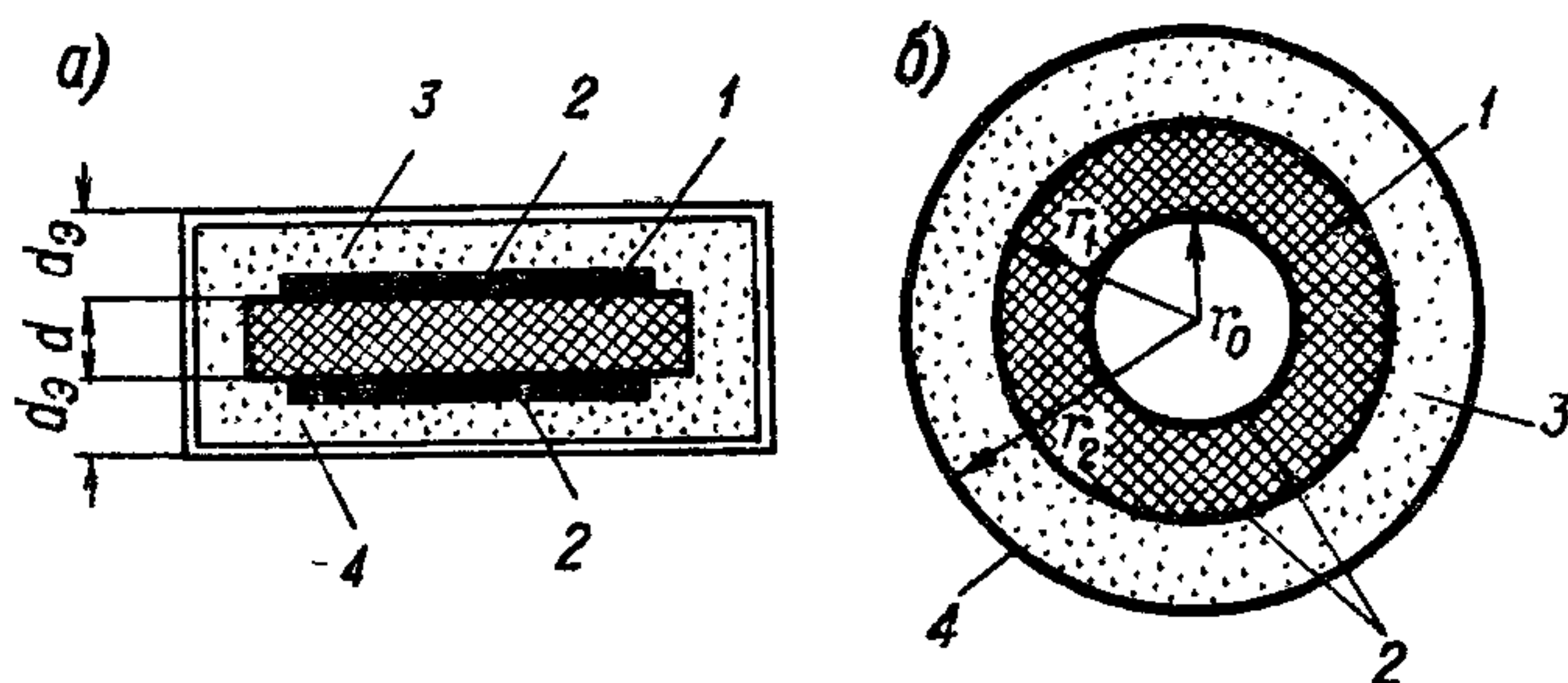


Рис. 83. К определению напряжения теплового пробоя: а — плоский конденсатор; б — цилиндрический конденсатор.

1 — диэлектрик конденсатора; 2 — обкладка; 3 — заливочная масса; 4 — стенка корпуса.

сы, наружной пластмассовой опрессовки и т. п. При вычислении параметра s можно рассматривать этот слой в качестве «электрода», подставляя в формулу (135) его толщину вместо d_3 и его коэффициент теплопроводности вместо λ_3 (рис. 83). Тепловым сопротивлением обкладок конденсатора и стенок металлического корпуса можно пренебречь, так как толщина их мала, а теплопроводность велика.

Если конденсаторная секция представляет собой стопку наложенных друг на друга N пластинок диэлектрика толщиной d_1 каждая, то для расчета $E_{\text{пр}}$ при тепловом пробое можно пользоваться теми же формулами (136) и (140) при условии, что вместо значения d в формулу подставляется сумма всех толщин диэлектрика, т. е. принимается $d = Nd_1$. Этим же методом можно вычислять $E_{\text{пр}}$ и для плоскопрессованного спирального конденсатора, рассматривая его плоскую часть как многопластинчатый конденсатор и принимая $d = 4Wd_1$, где W — число витков, а d_1 — толщина диэлектрика между обкладками. Это же значение d надо использовать и при вычислении параметра s по формуле (135).

Для цилиндрического конденсатора выражения для $E_{\text{пр}}$ при тепловом пробое имеют вид:

при постоянном напряжении

$$E_{\text{пр}} = 4,1 \frac{\varphi(c)}{d} \sqrt{\frac{\lambda \rho_0}{a}} \text{ [в/см]}; \quad (142)$$

при переменном напряжении с частотой f [гц]

$$E_{\text{пр}} = 5,52 \cdot 10^6 \frac{\varphi(c)}{d} \sqrt{\frac{\lambda}{a \epsilon f \operatorname{tg} \delta_0}} \text{ [в/см]}. \quad (143)$$

Обозначения в этих формулах те же, что и в случае плоского конденсатора, но величина параметра c находится по измененной формуле

$$c = \frac{2,3 \lambda_3 \alpha_T r_1 \lg \frac{r_1}{r_0}}{\lambda \left(\lambda_3 + 2,3 \alpha_T r_1 \lg \frac{r_2}{r_1} \right)}, \quad (144)$$

где r_0 — внутренний радиус слоя диэлектрика (наружный радиус внутреннего электрода) (см. рис. 81, б); r_1 — наружный радиус слоя диэлектрика (внутренний радиус внешнего электрода); r_2 — наружный радиус внешнего электрода; r_0 , r_1 и r_2 — в см.

Значения λ_3 , λ и α_T — те же, что и в формуле (135).

Для этого случая толщина диэлектрика $d = r_1 - r_0$, а толщина внешнего электрода $d_3 = r_2 - r_1$. Если пренебречь толщиной и тепловым сопротивлением внешнего электрода (например, в случае керамического трубчатого конденсатора), т. е. положить $r_2 = r_1$, то формуле (144) можно придать вид:

$$c = \frac{2,3 \alpha_T r_1 \lg \frac{r_1}{r_0}}{\lambda} = 1,15 \frac{\alpha_T}{\lambda} D \lg \frac{D}{D_0}, \quad (145)$$

где D — наружный, а D_0 — внутренний диаметр конденсатора в см.

Если цилиндрическая секция представляет собой намотанный (спиральный) конденсатор, то под величиной D надо понимать наружный диаметр секции, а под величиной D_0 — диаметр намоточной оправки, т. е. диаметр внутреннего отверстия в секции. Вместо толщины диэлектрика d в формулы (142) и (143) надо подставить суммарную толщину изоляции всех слоев диэлектрика намотанной секции; пренебрегая толщиной обкладок, можно написать:

$$d = \frac{D - D_0}{2}. \quad (146)$$

Если секция защищена от стенок металлического корпуса слоем дополнительной изоляции, или отделена от стенок слоем заливочной массы, или, наконец, помещена в изолирующий корпус (рис. 83, б), то, как и выше, толщину этого слоя (или стенки изолирующего корпуса) следует рассматривать как толщину электро-

да d_2 , а коэффициент теплопроводности этой изоляции — как λ_2 , используя для вычисления параметра s формулу (144).

В реальных конденсаторах условия отвода тепла более благоприятны, чем предусматривает теоретический расчет, вследствие наличия теплоотдачи не только в направлении, перпендикулярном плоскости обкладок, но и в направлении, параллельном этой плоскости (или в направлении торцов цилиндра). Поэтому расчет $E_{пр}$ при тепловом пробое по указанным выше формулам дает обычно несколько заниженные значения $E_{пр}$. Во всяком случае отрицательный результат расчета на тепловой пробой (т. е. когда расчетное значение пробивного напряжения оказывается ниже заданного номинального рабочего значения или равно ему) является сигналом о необходимости изготовления опытного образца конденсатора и проверки устойчивости его работы при выбранном рабочем напряжении и максимально возможной в эксплуатации температуре окружающей среды.

Удачная попытка разработать методику расчета напряжения при тепловом пробое с учетом торцового отвода тепла, применительно к силовому бумажномасляному конденсатору, была выполнена М. И. Мантровым¹.

§ 35. Ионизационный пробой

В § 31 отмечалось, что ионизационный пробой в конденсаторах с твердым диэлектриком может проявляться в широком интервале времени воздействия напряжения, начиная от долей секунды и кончая десятками и сотнями тысяч часов. Возможность развития пробоя этого типа связывалась ранее только с наличием в диэлектрике конденсатора воздушных (точнее газовых) включений, обусловленных пористостью диэлектрика или наличием зазоров между диэлектриком и обкладками; при изготовлении конденсаторов со слоистым диэлектриком воздушные включения могут образовываться также между отдельными слоями диэлектрика.

Если часть общего напряжения, приложенного к конденсатору, приходящаяся на долю воздушного включения, превысит величину, достаточную для пробоя воздуха в этом включении, то в последнем начинается процесс ионизации, представляющий систему следующих друг за другом разрядов. О начале этого процесса можно судить по перегибу на кривой $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ (рис. 61). Более чувствительным методом является обнаружение появления высокочастотных колебаний в кривой тока, потребляемого конденсатором, обусловленных началом разрядов в воздушных включениях. Эти колебания можно наблюдать на экране катодного осциллографа, отделив их от кривой основного тока соответствующим фильтром и усилив с помощью усилителя с высоким коэффициентом усиления.

¹ М. И. Мантров. «Вестник электропромышленности», 1953, № 8.

Общее значение напряжения, приложенного к конденсатору U_n , при котором начинается ионизация воздушных включений, называют ионизирующим напряжением, а соответствующее ему значение E_n — ионизирующей напряженностью. При ионизационном пробое очагом зарождения пробоя является газовое включение в твердом диэлектрике; после пробоя газа в этом включении происходит пробой той части твердого диэлектрика, которая прилегает к включению, за счет разрушения твердого вещества, вызванного явлениями, связанными с пробоем газа.

В случае органических диэлектриков такими явлениями, приводящими к разрушению твердого диэлектрика, являются:

а) непосредственное воздействие на диэлектрик бомбардировки ионами и электронами, освободившимися при ионизации газа;

б) воздействие высокой температуры, созданной в районе ионизации за счет местного повышения потерь;

в) химическое разрушение диэлектрика при воздействии на него продуктов ионизации воздуха — озона и окислов азота, являющихся сильными окислителями.

Последний из этих факторов сказывается только при длительном воздействии напряжения и обуславливает собой процесс старения диэлектрика при воздействии переменного напряжения (в некоторых случаях и при воздействии постоянного); два других фактора могут сказываться и при кратковременном воздействии напряжения, особенно первый из них. Этим можно объяснить, что ионизационный пробой может проявиться в конденсаторе как при малых, так и при больших значениях времени воздействия приложенного напряжения.

В случае неорганических диэлектриков, отличающихся заметно повышенной химической устойчивостью, ионизация воздушных включений опасна прежде всего потому, что сильный местный нагрев может привести к появлению механических усилий, способных вызвать растрескивание материала и пробой по появившимся трещинам; кроме того, общее повышение температуры конденсатора, связанное с увеличением его угла потерь вследствие ионизации, может создавать условия для развития теплового пробоя. В некоторых случаях слабая ионизация для неорганического диэлектрика не представляет особой опасности.

Представим себе воздушное включение вытянутым в направлении, параллельном обкладкам конденсатора; диэлектрик, содержащий такое включение, можно изобразить эквивалентной схемой рис. 84. На этом рисунке включение прилегает к электроду; однако оно может быть расположено и в средней части объема диэлектрика и не касаться ни одной из обкладок конденсатора.

Пусть напряжение на воздушном включении будет U_1 , напряжение на здоровой части диэлектрика U_2 и полное напряжение, приложенное к конденсатору, U .

При переменном напряжении, когда распределение напряжения обусловлено величиной емкостей, можно написать:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{d - d_1}{\epsilon d_1}$$

и

$$U = U_1 + U_2 = U_1 \left(1 + \frac{d - d_1}{\epsilon d_1} \right),$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика. Для газового включения значение этой характеристики принято равным единице. Напряжение U будет равно ионизирующему напряжению, когда U_1 достигает значения $U_{\text{пр.в.}}$, т. е. делается равным пробив-

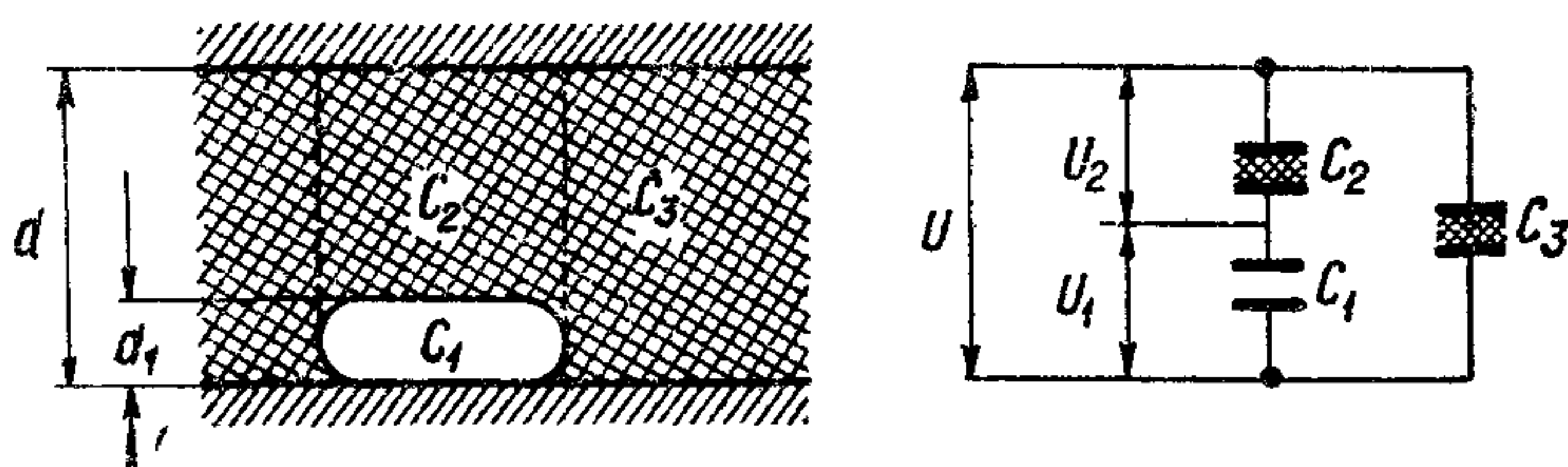


Рис. 84. Схема к определению зависимости ионизирующего напряжения от толщины диэлектрика: C_1 — емкость воздушного включения; C_2 — емкость изоляции, отделяющей включение от обкладок; C_3 — емкость остальной части изоляции.

ному напряжению воздуха при зазоре, равном d_1 . Поэтому можно написать

$$U_{\text{и}} = U_{\text{пр.в.}} \left(1 + \frac{d - d_1}{\epsilon d_1} \right) = \frac{U_{\text{пр.в.}}}{\epsilon d_1} [d + d_1 (\epsilon - 1)]. \quad (147)$$

Величина ионизирующей напряженности будет равна:

$$E_{\text{и}} = \frac{U_{\text{и}}}{d} = \frac{U_{\text{пр.в.}}}{\epsilon d_1} \left[1 + \frac{d_1 (\epsilon - 1)}{d} \right]. \quad (148)$$

Здесь $E_{\text{и}}$ в кВ/мм, если U — в в, а d и d_1 — в мм. При значениях d_1 порядка 6—8 мм и ниже пробивное напряжение воздуха можно принять равным минимально возможному пробивному напряжению (§ 31), т. е.

$$U_{\text{пр.в.}} = U_{\text{пр.мин}} = 250 \text{ в (эфф.)}.$$

Для того чтобы ионизация не имела места, следует требовать, чтобы $E_{\text{раб}} < E_{\text{и}}$. Согласно формуле (148), ионизирующая напряженность должна снижаться с увеличением толщины диэлектрика d , если при этом d_1 сохраняет постоянное значение. Этот теоретический вывод подтверждается данными опыта, причем в билогарифмическом масштабе зависимость $E_{\text{и}}$ от d выражается падающей прямой, что соответствует эмпирическому уравнению

$$\lg E_{\text{и}} = \lg a - b \lg d \text{ или } E_{\text{и}} = \frac{a}{d^b}. \quad (149)$$

Значение показателя степени b составляет обычно около 0,5. В связи с этим при изготовлении конденсаторов высокого напряжения с целью повышения $E_{и}$ и соответственного повышения $E_{\text{раб}}$, т. е. для лучшего использования диэлектрика, выгодно разбивать конденсатор на ряд последовательно соединенных секций; при этом сумма толщин диэлектрика во всех секциях получится меньше, чем толщина диэлектрика в не-секционированном конденсаторе. При выборе толщины диэлектрика в секции надо учесть зависимость кратковременной электрической прочности от толщины диэлектрика (рис. 77, выше); при очень малой толщине $E_{и}$ будет высоким, но $E_{\text{пр}}$ может снизиться настолько, что запас электрической прочности окажется недостаточным. Это наглядно показывает рис. 85. Ранее, когда ионизационные явления были изучены недостаточно, при секционировании конденсаторов ориентировались только на величину кратковременной прочности и толщину диэлектрика в секции брали равной оптимальной d' , при которой $E_{\text{пр}}$ достигает максимума. Теперь часто выбирают несколько меньшее значение d'' , при котором достаточная величина кратковременной прочности сочетается с повышенным значением $E_{и}$.

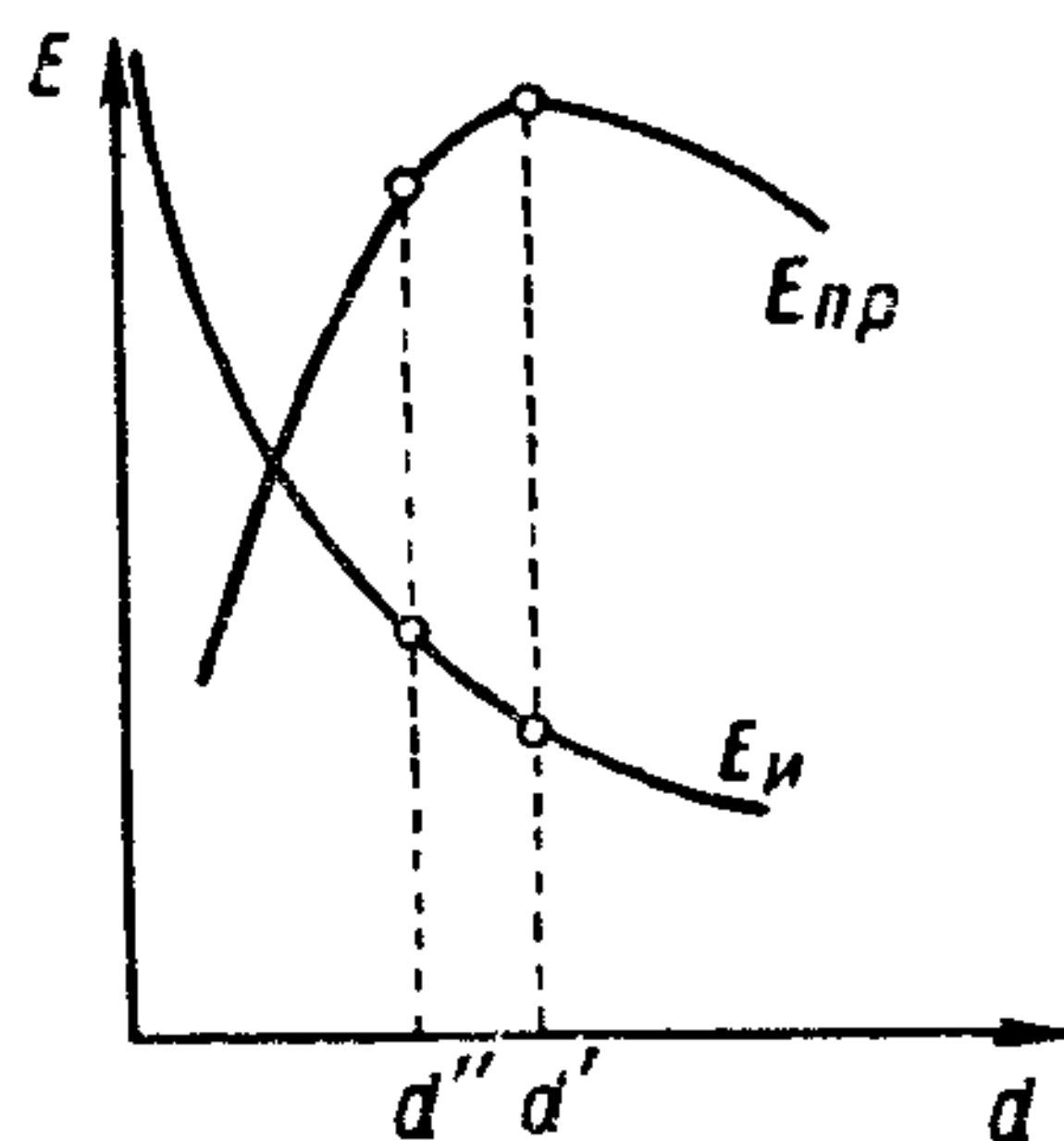


Рис. 85. Общий характер зависимости кратковременной электрической прочности и ионизирующей напряженности конденсатора со слоистым диэлектриком от толщины диэлектрика.

Ранее считали, что ионизация воздушных включений в диэлектрике при постоянном напряжении не может иметь места и проявляется лишь в мо-

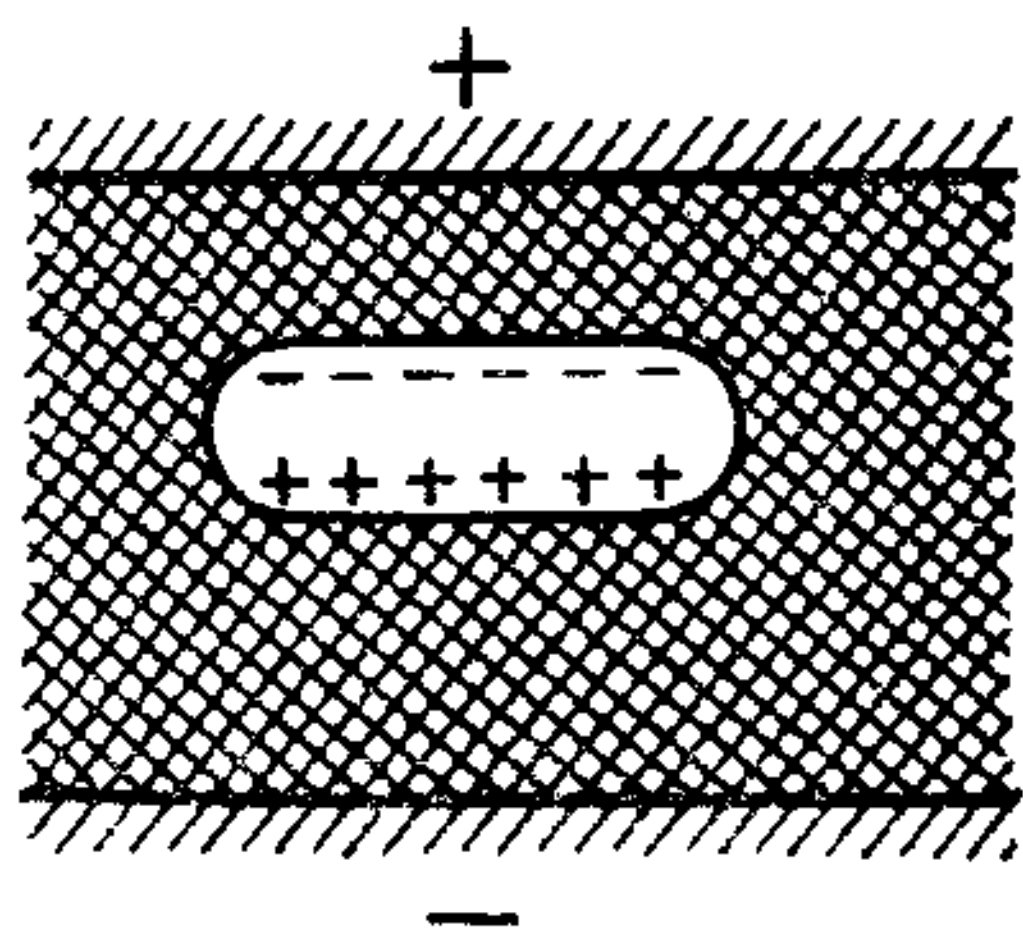


Рис. 86. Схема к рассмотрению ионизации при постоянном напряжении.

менты включения и выключения напряжения. Это мотивировали тем, что ионы, образующиеся в воздушном включении при первой вспышке ионизации, оседают на стенках включения, образуя напряжение, направленное противоположно той части основного напряжения, которая приложена к включению (рис. 86). При этом результирующее напряжение на включении делается равным нулю и возможность ионизации исключается. Однако такое объяснение не учитывает возможности стекания ионов по боковым стенкам включения за счет поверхностной проводимости,

а также возможности их движения через толщу диэлектрика за счет объемной утечки. Стеkanie зарядов со стенок включения делает возможным следующую вспышку ионизации и так далее. Число таких вспышек в единицу времени может быть невелико, если проводимость диэлектрика мала, т. е. постоянная времени конденсатора велика, а потому интенсивность ионизационных процессов при постоянном

напряжении обычно много меньше, чем при переменном, когда вспышки ионизации происходят за каждый полупериод изменения напряжения. Однако, если постоянная времени конденсатора резко снижается, например при его отсыревании или при сильном нагревании, то стекание зарядов ускоряется и количество вспышек ионизации в единицу времени резко возрастает; интенсивность процесса ионизации может при этом стать такой же сильной, как и при переменном напряжении (рис. 87).

Величина ионизирующего напряжения $U_{и}$, измеренная при постоянном напряжении, может отличаться от соответствующих значений, измеренных при переменном напряжении, так как перераспределение напряжения между здоровой частью диэлектрика и

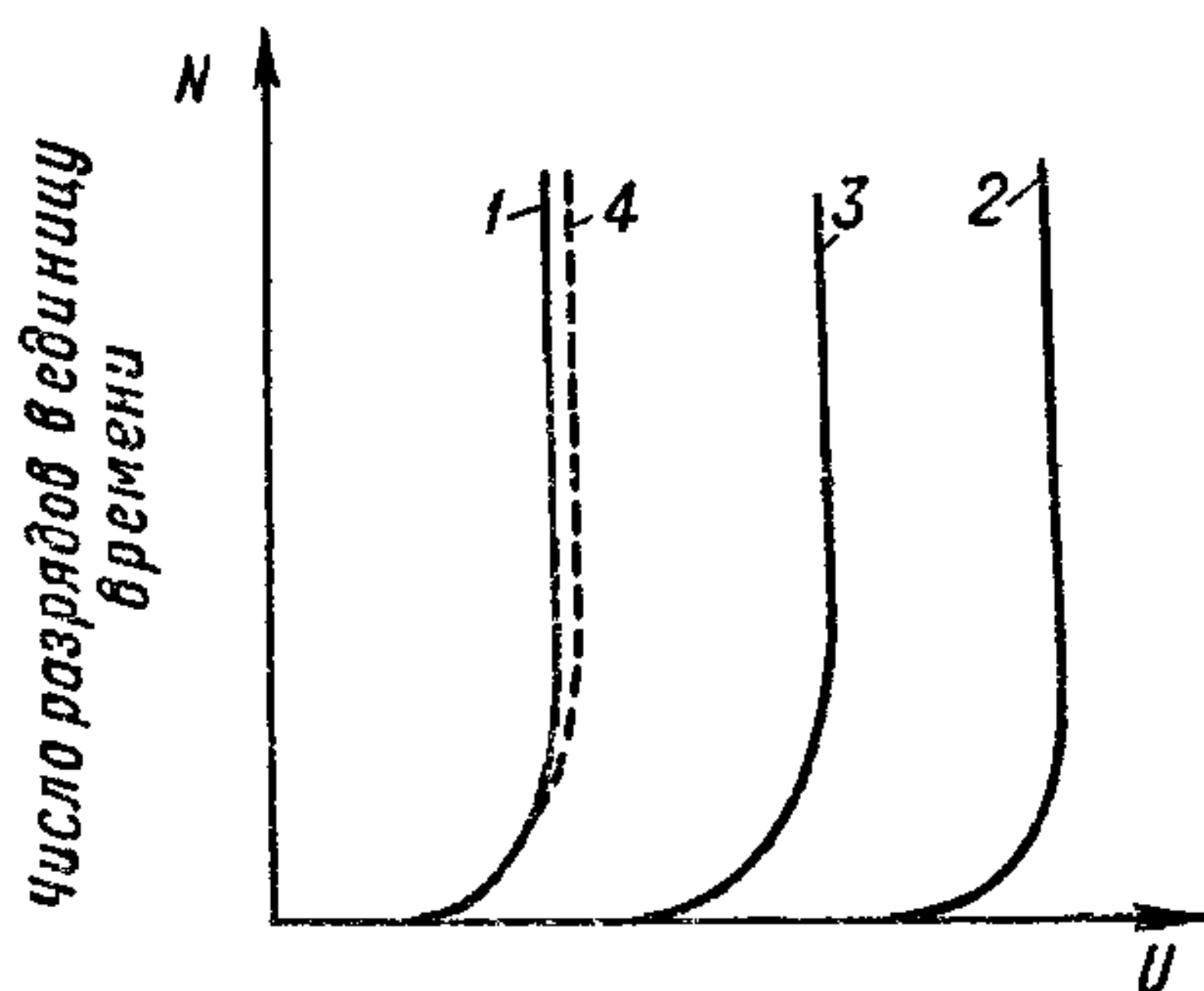


Рис. 87. Зависимость интенсивности ионизации от напряжения.

1 — переменное напряжение; 2, 3, 4 — постоянное напряжение; 2 — сухой образец при комнатной температуре; 3 — сухой нагретый образец; 4 — увлажненный образец.

воздушным включением, от чего зависит величина $U_{и}$, при постоянном напряжении определяется уже не соотношением емкостей этих элементов изоляции, а соотношением их проводимостей. Обычно $U_{и}$ при постоянном напряжении оказывается несколько выше, чем при переменном.

Возвращаясь к формуле (148), можно отметить, что она указывает на снижение $E_{и}$ с повышением ϵ диэлектрика. Это надо иметь в виду при использовании диэлектрика с повышенной ϵ , так как снижение $E_{раб}$ в соответствии с понижением $E_{и}$ может ослабить эффект

увеличения емкости, достигнутый за счет повышения ϵ , вследствие увеличения толщины диэлектрика при снижении $E_{раб}$.

Следует напомнить, что формула (148) получена в предположении, что воздушное включение имеет вытянутую форму и расположено параллельно обкладкам конденсатора. Чаще приходится иметь дело с небольшими включениями шарообразной формы («пузырьками»), когда распределение напряжений будет более сложным, чем принято при выводе формулы (148). Тем не менее ее можно применять для качественной оценки ионизационных процессов в диэлектрике конденсатора.

Резкое повышение $E_{и}$, а следовательно, и $E_{раб}$ можно получить, заменяя воздух в порах диэлектрика или в зазорах между слоями диэлектрика (или между диэлектриком и обкладкой) изоляционной жидкостью, т. е. производя пропитку конденсатора. Если диэлектрическая проницаемость жидкости $\epsilon_{ж}$, а пробивное напряжение ее в тонких зазорах $U_{пр.ж}$, то формулу (148) можно переписать так:

$$E_{и} = \frac{U_{пр.ж}}{\epsilon d_1} \left[\epsilon_{ж} + \frac{d_1 (\epsilon - \epsilon_{ж})}{d} \right]. \quad (150)$$

Сопоставляя это выражение с формулой (148), видим, что $E_{\text{и}}$ должно увеличиться как за счет того, что пробивное напряжение жидкости $U_{\text{пр.ж}} > U_{\text{пр.в}}$, так и за счет замены единицы под знаком скобок величиной $\epsilon_{\text{ж}}$, т. е. более благоприятным распределением напряжения между включением и здоровой частью диэлектрика. Поэтому пропитка пористого диэлектрика или заливка зазоров между слоями непористого диэлектрика и обкладками позволяет заметно увеличить $E_{\text{раб}}$, если при выборе его значений приходилось основываться на соображении об исключении возможности развития ионизации. При пропитке или заливке конденсатора жидким диэлектриком необходимо поддерживать достаточно высокий вакуум, чтобы максимально удалить воздух из пор перед входом в них жидкого диэлектрика. Сам жидкий диэлектрик должен быть предварительно обезгажен.

При использовании вместо жидкости твердых пропиточных или заливочных масс, вводимых в конденсатор в жидком состоянии, а затем отвердевающих, приходится считаться с их свойством давать усадку при отвердевании. При таких массах нельзя гарантировать полного устранения воздушных включений в диэлектрике; при пропитке воскообразными массами, отвердевающими только за счет охлаждения до температуры ниже их точки плавления, усадка, т. е. объем пор, оставшийся не заполненным пропиточной массой, может достигать 10—15%; при пропитке новыми типами пропиточных масс (полиэффирами, эпоксидными смолами) усадка связана с отвердеванием, вызванным процессами полимеризации; в этом случае усадка не превышает нескольких процентов. Тем не менее и тут приходится учитывать неизбежное наличие остаточного воздуха, а потому для конденсаторов с твердой пропиткой обычно допускают рабочие переменные напряжения не выше 250 в (эфф., 50 гц), когда вообще ионизация не должна иметь места. При постоянном напряжении, когда ионизационные процессы ослаблены, для конденсаторов, пропитанных твердыми массами, допускают напряжения порядка 600—1000 в. При большей величине постоянного напряжения обычно применяют пропитку жидким диэлектриком.

Ранее предполагалось, что при пропитке жидким диэлектриком благодаря тому, что она происходит не при идеальном вакууме, в изоляции конденсатора остается воздух в виде маленьких пузырьков, которые и служат очагами для начала и развития ионизации. В этом случае повышение $E_{\text{и}}$ после пропитки объясняли тем, что уменьшение размеров остаточных газовых включений приводит к увеличению электрической прочности остаточного газа.

В настоящее время при сушке и пропитке многих типов конденсаторов достигают остаточного давления порядка 10^{-2} — 10^{-4} мм рт. ст. Такой же высокий вакуум используется и при дегазации пропиточной жидкости перед пропиткой конденсаторов. Учитывая, что дегазированные жидкости способны растворять относительно большое количество газов (например, нефтяное

масло при 20°C растворяет около 10% воздуха по объему), можно прийти к выводу о полном отсутствии газовых пузырьков в конденсаторе, тщательно пропитанном жидким диэлектриком. В этом случае следует считать, что ионизационные процессы связаны с пробоем жидкого диэлектрика в порах и зазорах изоляции конденсатора. В связи с этим в формулу (150) и введено значение $U_{\text{пр.ж}}$ в тонких слоях.

Определение напряжения начала ионизации в конденсаторе, тщательно пропитанном жидким диэлектриком, связано с извест-

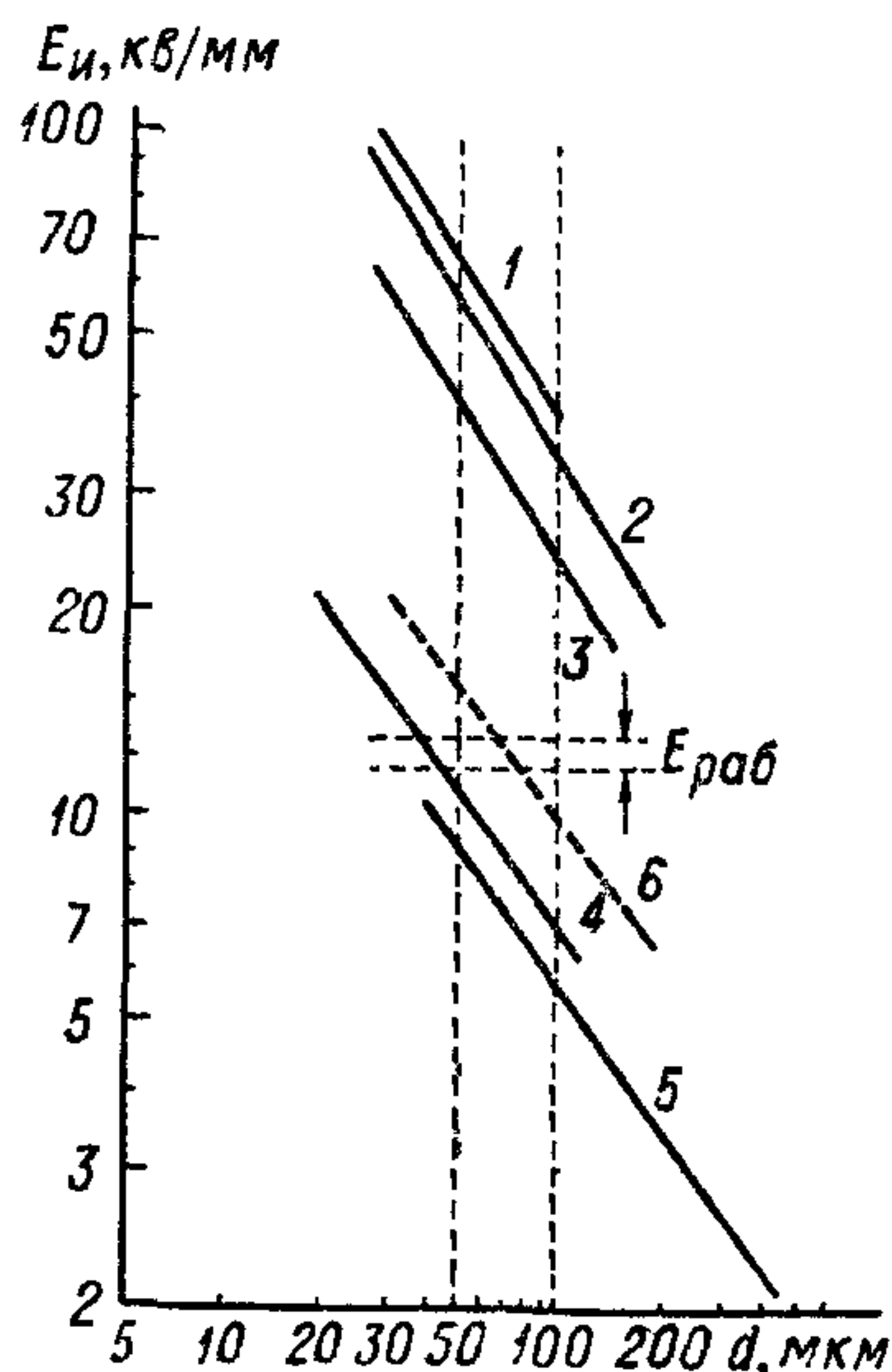


Рис. 88. Зависимость ионизирующей напряженности от толщины диэлектрика в бумажных конденсаторах (пояснения в тексте).

ными трудностями, так как для того, чтобы заметить первые слабые признаки начинающихся разрядов в жидкости, необходима высокая чувствительность измерительной установки. Поэтому в литературе встречается большой разброс данных о величине начального напряжения ионизации даже для такого хорошо изученного в этом отношении типа конденсаторов, как бумажномасляный (рис. 88). Ранее получали резкое различие между напряженностью начала ионизации $E_{\text{и.нач}}$ для хорошо пропитанных маслом конденсаторов (прямые 1, 2 и 3) и величиной $E_{\text{и}}$ для таких же непропитанных конденсаторов (прямая 4) или конденсаторов, пропитанных без вакуума (специальный опыт для облегчения обнаружения ионизации) (прямая 5). Более поздние данные, полученные на установке высокой чувствительности (прямая 6), лежат довольно близко к данным для

непропитанных конденсаторов. Кривая 6 соответствует чувствительности установки порядка 10^{-14} ж и согласуется с данными, которые можно получать, исследуя начало свечения в масле с помощью фотоэлектронного умножителя.

Получавшиеся ранее данные о величине $E_{\text{и}}$ при обычной толщине диэлектрика силового бумажномасляного конденсатора $d \approx 50 \div 100$ мкм лежали в пределах от 40—70 до 25—40 кВ/мм, что давало значительный запас по отношению к обычному значению рабочей напряженности 12—13 кВ/мм (эфф., 50 гц). Поэтому можно было ожидать, что в условиях эксплуатации бумажномасляных конденсаторов при переменном напряжении явление ионизации не должно было иметь места, а потому срок службы конденсаторов при таком значении $E_{\text{раб}}$ должен был быть бесконечно велик. Однако во многих случаях наблюдался выход конденсаторов из строя после относительно непродолжительной ра-

боты, порядка 2—3 лет, а иногда даже меньше, хотя были известны и отдельные случаи успешной работы конденсаторных батарей в течение времени порядка 10 лет и выше.

Объяснение этому было найдено при исследовании влияния перенапряжений на работу таких конденсаторов. Было показано, что даже при кратковременном воздействии напряжения, значи-

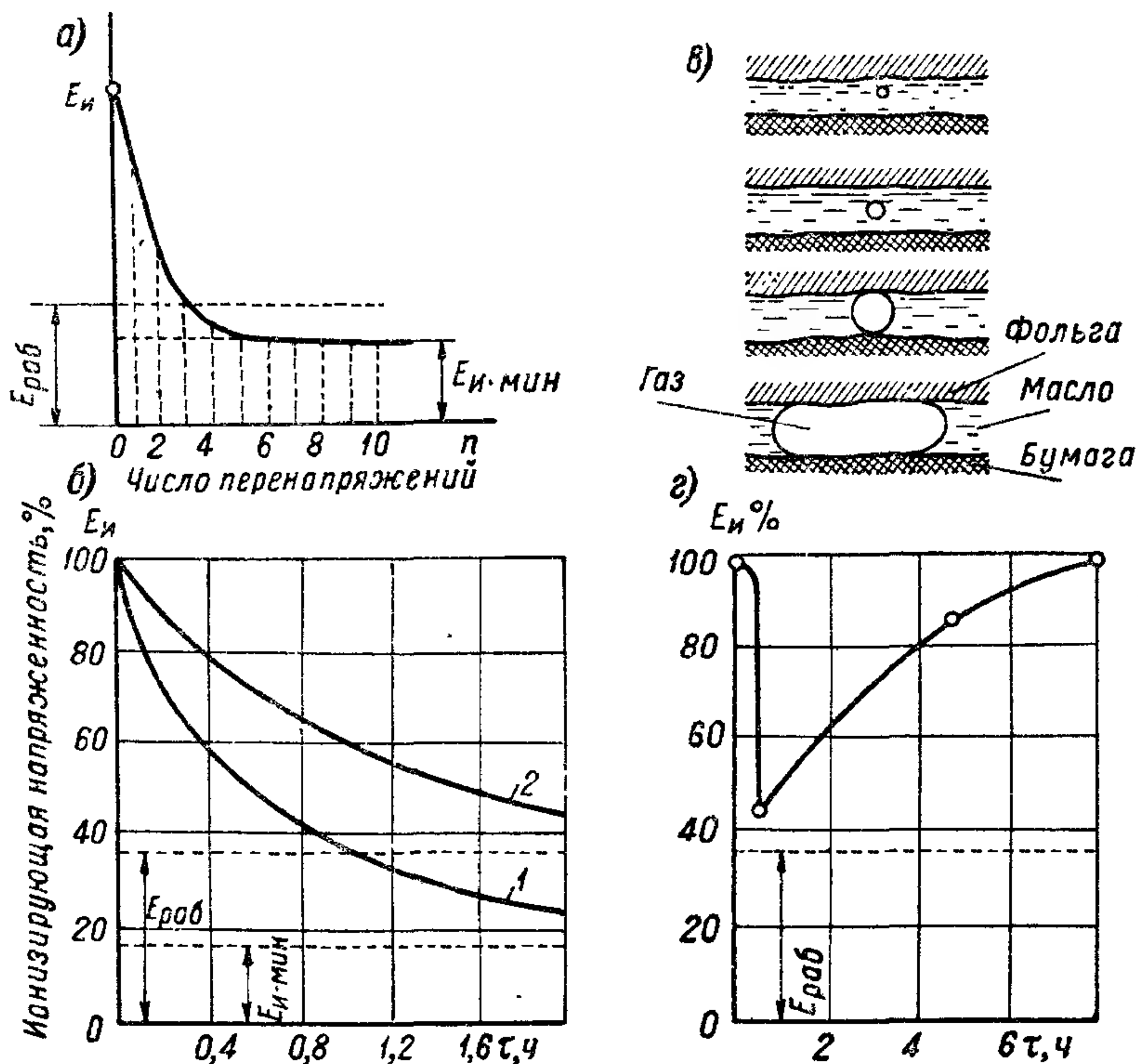


Рис. 89. Нестабильность ионизирующей напряженности в бумажно-масляных конденсаторах: а — общий характер зависимости $E_{и}$ от числа перенапряжений; б — зависимость $E_{и}$ от продолжительности воздействия перенапряжения (диэлектрик 80 мк: 1 — пятикратное, 2 — четырехкратное напряжение); в — схема изменения размеров газового пузырька в масляном зазоре при воздействии кратковременных перенапряжений; г — восстановление $E_{и}$ после его снижения, вызванного единичным перенапряжением.

тельно превышающего $E_{и}$, величина $E_{и}$ заметно снижается, причем при неоднократных следующих один за другим воздействиях ионизирующая напряженность стремится к некоторому установившемуся значению $E_{и \cdot мин}$, примерно соответствующему тем значениям, которые получаются для непропитанного конденсатора или пропитанного без вакуума, т. е. с большим остаточным содержанием воздуха (рис. 89, а). Тот же эффект получается при непрерывном воздействии меньшего напряжения, но все же превышающего начальное значение ионизирующего (рис. 89, б).

Это можно объяснить тем, что при пробое масла происходит его разложение с выделением газа (водорода) в виде пузырька. Следующие разряды происходят уже в газовом пузырьке, соответственно при меньшем напряжении. Дополнительное выделение газа увеличивает размеры газового пузырька и дополнительно снижает ионизирующее напряжение до тех пор, пока диаметр газового пузырька не сравняется с толщиной зазора между обкладкой и первым слоем бумаги, где обычно развивается ионизационный процесс. Далее размер газового включения в направлении действия поля, определяющий собой напряжение $U_{и}$, уже не меняется и объем газа увеличивается только за счет его расширения в направлении, параллельном обкладке (рис. 89, в). Интенсивность ионизации при этом возрастает, но при неизменном значении $U_{и. мин}$. Поскольку значение $U_{и. мин}$ соответствует величине $E_{и. мин} < E_{раб}$, процесс ионизации усиленно развивается при рабочем напряжении и приводит конденсатор к гибели.

Однако при единичных перенапряжениях, достаточно кратковременных для того, чтобы сниженное значение $E_{и}$ еще оставалось бы выше величины $E_{раб}$ при последующем снижении напряжения до рабочего значения, величина $E_{и}$ постепенно восстанавливается до исходного значения за счет того, что выделившийся при кратковременной ионизации газ растворяется в масле (рис. 89, г). Ионизация, приводящая к быстрому снижению величины $E_{и}$ до значения $E_{и. мин}$, носит название критической ионизации. Возникновение в диэлектрике конденсатора такой ионизации быстро выводит его из строя. Поэтому ионизационный пробой может быть одним из видов кратковременного пробоя.

Начальная слабая ионизация, регистрируемая современными высокочувствительными приборами, в отличие от старых данных, полученных при меньшей чувствительности, уже лежит на уровне значений $E_{раб}$ (см. на рис. 88 прямую 6). При малой интенсивности процесса ионизации в изоляции, пропитанной маслом, одновременно идут процессы выделения газа и растворения его в масле. Это не представляет опасности до тех пор, пока масло не будет полностью насыщено газом, т. е. его способность к растворению газа не будет полностью исчерпана. Когда это случится, начнется выделение газа в виде пузырьков и конденсатор попадает в режим критической ионизации, быстро приводящей его к гибели. При обычных значениях $E_{раб}$ это весьма длительный процесс, так как количество выделяемого газа невелико; в этих условиях срок службы конденсатора измеряется годами и даже десятками лет, если в сети отсутствуют перенапряжения, которые могут быстро привести к критической ионизации, сразу выделив относительно большое количество газа, которое не успеет раствориться и приведет к интенсивному разложению масла за счет развития разрядов в образующейся газовой фазе.

Явление развития ионизационных процессов мы рассмотрели на примере бумажномасляного конденсатора, но приведенные

здесь данные можно, очевидно, распространить и на случай других типов конденсаторов, в которых твердый диэлектрик используется в сочетании с маслом.

Так, в японской работе по исследованию ионизации в пленочных конденсаторах, пропитанных маслом (исследованы двухслойные конденсаторы из пленок полиэтилена, полиэтилентерефталата и поликарбоната с толщиной диэлектрика 20—40 мкм) было показано, что если напряжение начала ионизации достаточно велико, порядка 2000—2500 в (50 гц), то напряжение погасания ионизации, соответствующее $U_{и мин}$, много ниже. При напряжениях выше начального ионизирующего (видимо оно соответствовало в этих опытах напряжению критической ионизации) срок службы оказался меньше 10 мин; в пределах напряжения между начальным напряжением и $U_{и мин}$ снижение напряжения на каждые 300 в дает увеличение времени службы на один порядок величин, так что зависимость срока службы от напряжения носит экспоненциальный характер. Отмечается, что в процессе старения наблюдалось сначала возрастание амплитуды ионизационных разрядов, а затем увеличение частоты разрядов с увеличенной амплитудой.

Неприятная склонность нефтяных масел и других углеводородных жидких диэлектриков к газовыделению в электрическом поле уже давно обратила на себя внимание работников конденсаторостроения. Был опробован ряд способов предотвратить или ослабить это явление.

1. Повышение давления в конденсаторе. При этом с одной стороны увеличивается растворимость газов в масле, а с другой стороны, даже при образовании газовых пузырьков, величина $E_{и}$ остается на достаточно высоком уровне, так как электрическая прочность газа повышена при увеличенном давлении (рис. 69, выше). Голландской фирмой Филлипс был разработан бумажно-масляный конденсатор в цилиндрическом корпусе из стальной трубы, в котором над зеркалом масла создавалось давление 15 кг/см² с помощью сжатого азота, впущенного под крышку конденсатора. Конструкция конденсатора оказалась дорогой и тяжелой; кроме того, при пробое конденсатора и разрушении стенки корпуса получалось нечто вроде зажигательной бомбы, так как из конденсатора интенсивно разбрасывалось горящее масло. Более удачные результаты были получены шведской фирмой АСЕА, применившей прямоугольный металлический корпус с упругими стенками из специальной стали, в котором поддерживалось давление масла порядка 4 кг/см². Эти конденсаторы показали хорошую надежность в эксплуатации, но имели ограниченный нижний предел рабочей температуры, так как заданное значение давления масла трудно было поддерживать постоянным в широком диапазоне температур.

2. Применение масел с повышенной «газостойкостью», т. е. с уменьшенной склонностью к газовыделению в электрическом поле. Этого достигают как используя масла, полученные из сортов

нефти определенных специально выбранных месторождений, так и применяя специальную очистку масел, обеспечивающую определенный состав содержащихся в них углеводородов. Кроме того, возможно также введение в масло специальных присадок, способных присоединять водород — основной газ, выделяющийся при разложении масла в электрическом поле. Все эти способы трудно осуществить на практике, когда для современного массового производства силовых конденсаторов требуются весьма большие количества жидкости диэлектрика, исчисляющиеся тысячами тонн.

3. Отказ от применения масла с заменой его другими, более надежными продуктами. Еще давно (в 1931 г.) в США были разрабо-

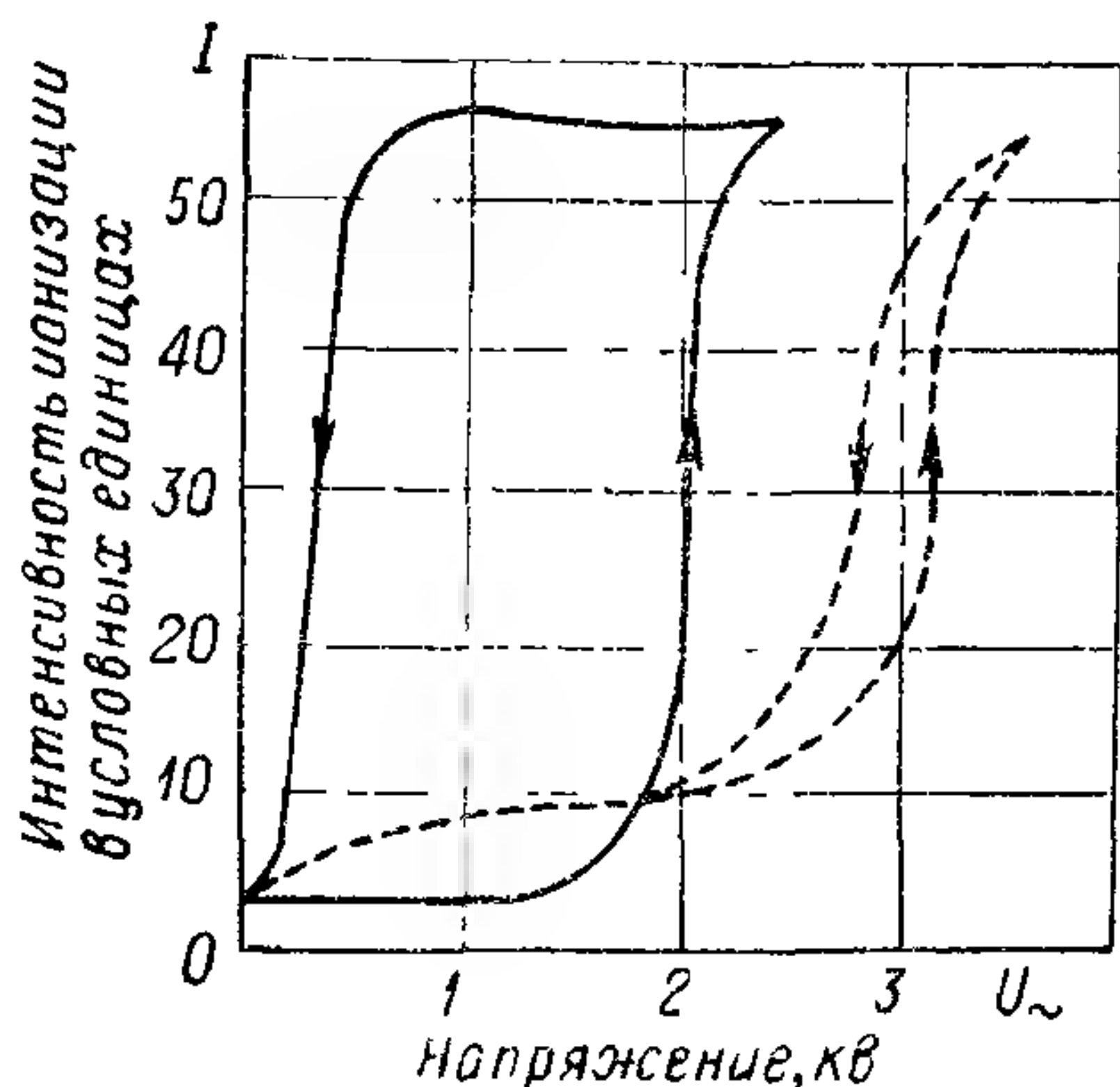


Рис. 90. Зависимость интенсивности ионизации в бумажном силовом конденсаторе от напряжения (в долях номинального рабочего) при возрастании и при снижении напряжения; сплошная линия — пропитка нефтяным маслом; прерывистая — пентахлордифенилом.

таны бумажные силовые конденсаторы, «пропитанные» вместо масла сжатым азотом при давлении порядка 15 кг/см^2 (тип «Permittor»). Однако они через несколько лет были сняты с производства, так как имели недостаточно удовлетворительные удельные характеристики (в бумаге при «пропитке» газом не увеличивается, т. е. будет заметно меньше, чем при пропитке жидким диэлектриком) и относительно сложную конструкцию. Однако этот принцип нашел себе применение позже при разработке фторопластовых пленочных конденсаторов высокого напряжения, рассчитанных на повышенную рабочую температуру (§ 83). Более жизненным путем оказалась замена масла полярными хлорированными жидкостями типа хлордифенилов,

которые не только отличаются повышенной устойчивостью в электрическом поле (рис. 90), но и обладают более высокой ϵ , чем масло, а также рядом других преимуществ (§ 77).

Тем не менее, благодаря своей дешевизне и доступности нефтяное масло еще сохраняет достаточно широкое применение в конденсаторостроении, особенно у нас.

На основе описанного выше механизма развития ионизации, при котором критическая ионизация и гибель конденсатора наступают после насыщения масла в конденсаторе газом, были сделаны попытки произвести расчет времени, необходимого для полного насыщения масла (обезгаженного в исходном состоянии) тем количеством газа, которое выделяется за счет ионизационных процессов, и тем самым предугадать срок жизни конденсатора при заданном значении $E_{\text{раб}}$. Эти попытки дали результаты скорее качественного, чем количественного характера.

Процессы появления ионизации при переменном напряжении в бумажномасляных конденсаторах связаны с краем обкладки, где за счет краевого эффекта напряженность поля повышена. Образующийся при этом газ в виде пузырьков втягивается затем в зазор между обкладкой и первым листком бумаги, где и развивается дальнейший процесс разрушения масла. Влияние краевого эффекта приводит к снижению $E_{и}$ с увеличением толщины диэлектрика (рис. 88), аналогичному снижению $E_{пр}$ при увеличении толщины диэлектрика (рис. 76, б).

При постоянном напряжении влияние краевого эффекта сказывается слабее, чем при переменном, а потому начало ионизации необязательно связано с краем обкладки и чаще наблюдается в каком-то участке под обкладками. При этом резкая зависимость $E_{и}$ от толщины диэлектрика не должна проявляться.

При одновременном воздействии на конденсатор постоянного и переменного напряжений, например, при работе в цепях фильтров, когда кроме постоянной составляющей в кривой напряжения содержится и переменная (рис. 17, выше), вопрос о развитии ионизационных явлений в диэлектрике осложняется. Как указывалось выше, при достаточно высокой постоянной времени интенсивность ионизации при постоянном напряжении, характеризуемая числом разрядов в единицу времени, мала, а потому при небольшом превышении приложенного напряжения над соответствующим значением напряжения начала ионизации $U_{и}$ проявление ионизации мало заметно.

Однако можно опасаться того, что с течением времени будет происходить постепенное снижение величины $U_{и}$. Когда она снизится до уровня переменной составляющей, то под действием последней в конденсаторе может начаться уже достаточно интенсивная ионизация. При этом, если переменная составляющая превышает $U_{и}$, то вспышки ионизации будут происходить как и при чисто переменном напряжении каждый период дважды: на положительной и отрицательной амплитудах (рис. 91, а); если же переменная составляющая меньше $U_{и}$, а постоянная составляющая выше $U_{и}$, причем постоянная времени у конденсатора понижена, то вспышки ионизации будут происходить один раз за каждый период на гребнях кривой пульсирующего напряжения, получающейся при сложении постоянной и переменной составляющих (рис. 91, б).

В связи с этим для исключения возможности развития ионизации при пульсирующем напряжении необходимо, чтобы величина переменной составляющей не превышала нижнего предела ионизирующего напряжения $U_{и\text{ мин}}$, а сумма постоянной составляющей и амплитуды переменной составляющей не превышала бы верхнего предела $U_{и}$, получаемого при постоянном напряжении.

Величина $U_{и}$ для бумажных конденсаторов, пропитанных жидким диэлектриком, при переходе от частоты 50 гц к звуковым частотам может снизиться на 50%, т. е. относительно не очень сильно. Однако интенсивность ионизации при повышении частоты

резко возрастает, поскольку вспышки ионизации происходят дважды за каждый период. Для органических диэлектриков, химически разрушающихся действием разрядов (или разрушающихся вследствие эрозии под действием электрического разряда), можно ожидать, что скорость этого разрушения, т. е. скорость снижения электрической прочности, будет определяться числом вспышек ионизации за единицу времени. Поэтому снижение электрической прочности подобных

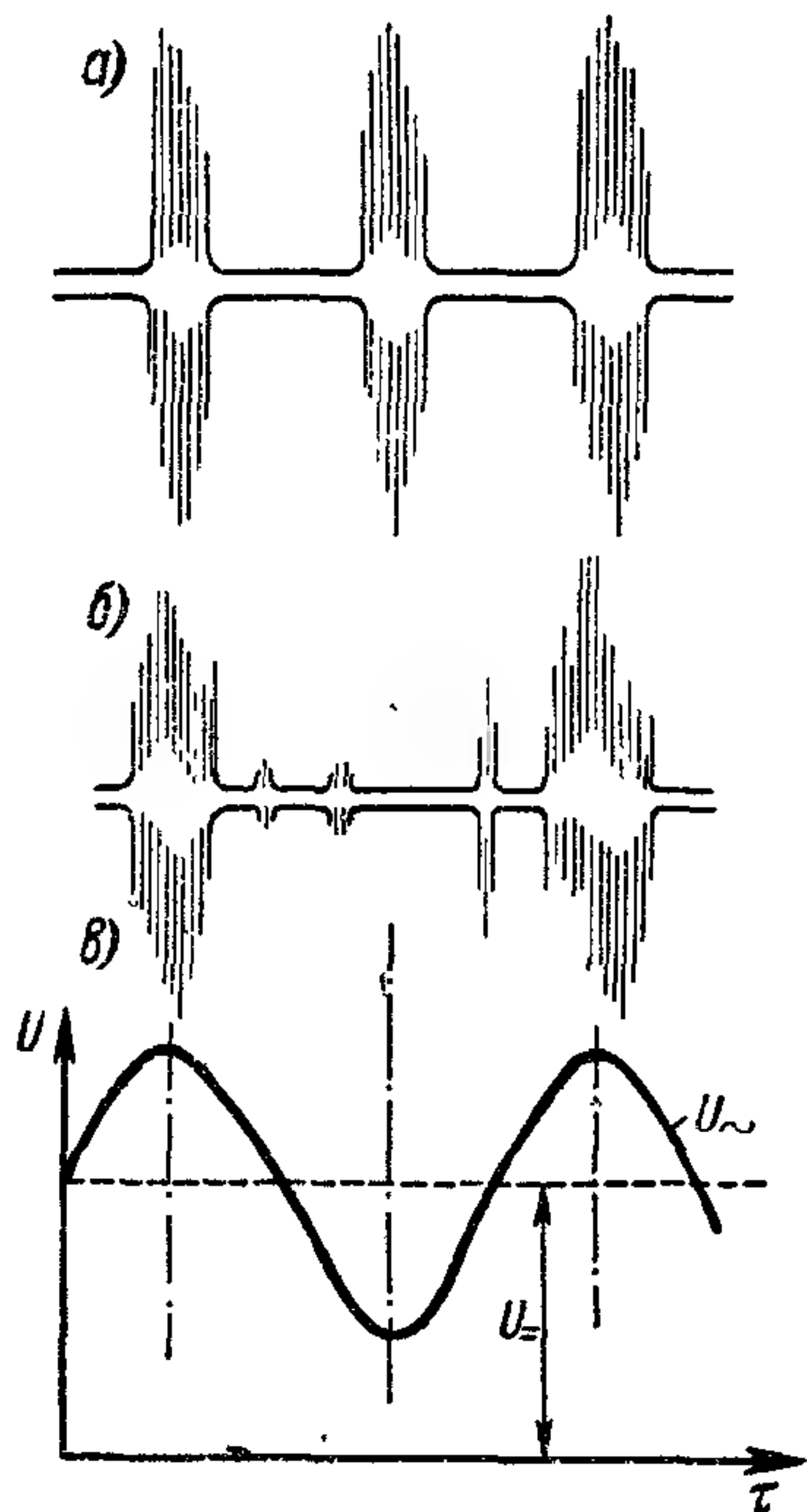


Рис. 91. Ионизация в бумажном конденсаторе при пульсирующем напряжении: а — переменная составляющая превышает $U_{и}$; б — переменная составляющая меньше $U_{и}$, но постоянная составляющая — выше.

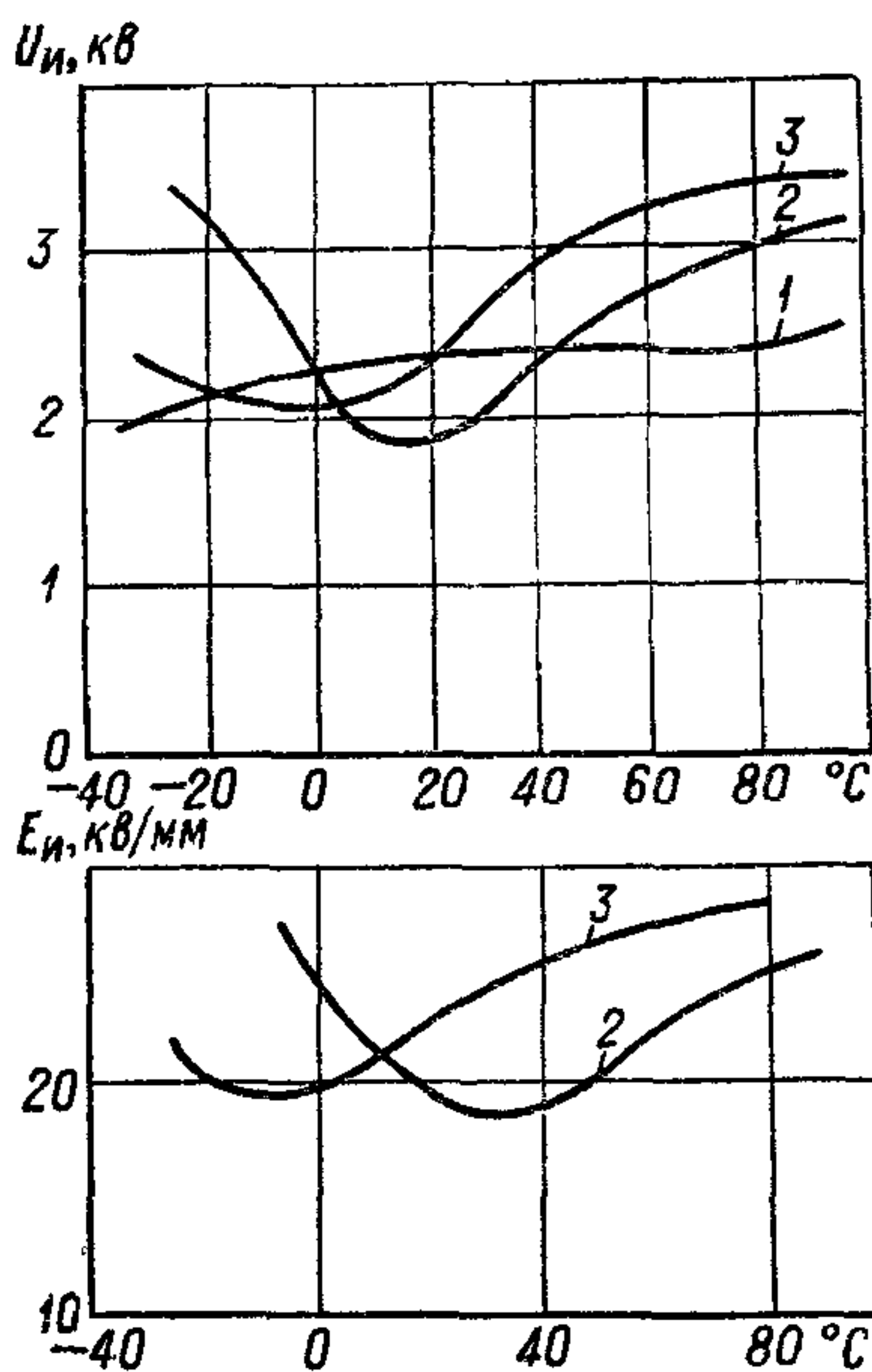


Рис. 92. Зависимость ионизирующего напряжения (вверху), по данным ФРГ, и ионизирующей напряженности (внизу), по японским данным, от температуры.

1 — пропитка маслом; 2 — пропитка пентахлордифенилом; 3 — пропитка трихлордифенилом.

материалов должно закономерно зависеть от произведения времени действия напряжения, превышающего $U_{и}$, на частоту. В ряде случаев было показано, что при испытании пленочных синтетических материалов, а также изоляции полиэтиленовых кабелей наблюдается линейное снижение логарифма отношения $U_{пр}/U_{и}$ при увеличении логарифма произведения $f\tau$.

При переменном напряжении ионизирующее напряжение относительно слабо зависит от температуры (рис. 92), причем характер изменения в значительной степени определяется типом пропитывающей жидкости; при постоянном напряжении наблюдается достаточно резко выраженное снижение $E_{и}$ с ростом температуры,

особенно при пропитке маслом; пропитка синтетической вязкой массой — октолом — заметно ослабляет температурную зависимость ионизирующей напряженности (рис. 93).

Повышение температуры должно сокращать срок службы конденсаторов, в которых происходят ионизационные процессы, так как при этом усиливаются процессы химического разрушения, связанные с наличием ионизационных разрядов.

По данным Менкрафта и Вельдона (США) для конденсаторов, пропитанных хлордифенилом, срок службы при частоте 60 гц в зависимости от температуры характеризуется данными, приведенными ниже:

Температура (внутри конденсатора), °С	95	100	105	110	115	120
Срок службы, %	Более 100	100	50	22	12	8

Здесь срок службы 100% соответствует примерно 20—30 годам работы при номинальном напряжении, причем допускается выход из строя не более 10% конденсаторов. Данные этой таблицы соответствуют эмпирической формуле: $\tau = \frac{K}{(Ut)^{7.7}}$ где U — напряжение (в данном случае $U = U_{ном}$), t — температура конденсатора и K — константа.

Как было отмечено выше, при относительно невысоких значениях $E_{раб}$, когда интенсивность ионизационных процессов невелика, явление химического разрушения может обуславливать весьма медленный процесс старения, длящийся годами, но все же приводящий в конце концов к пробое конденсатора. Постепенное снижение электрической прочности при этом виде старения со временем воздействия напряжения на конденсатор часто характеризуют эмпирической формулой, выражающей зависимость срока службы от напряжения, приложенного к конденсатору:

$$\tau = \frac{A}{U^n} \tag{151}$$

Эта формула основывается на том, что результаты опыта по определению данной зависимости обычно удовлетворительно укладываются на падающую прямую в билогарифмической системе координат. Для силовых конденсаторов, работающих при частоте 50—60 гц, обычно указываемые значения n лежат в пределах 5—7, но можно найти и данные, укладывающиеся в более широкий

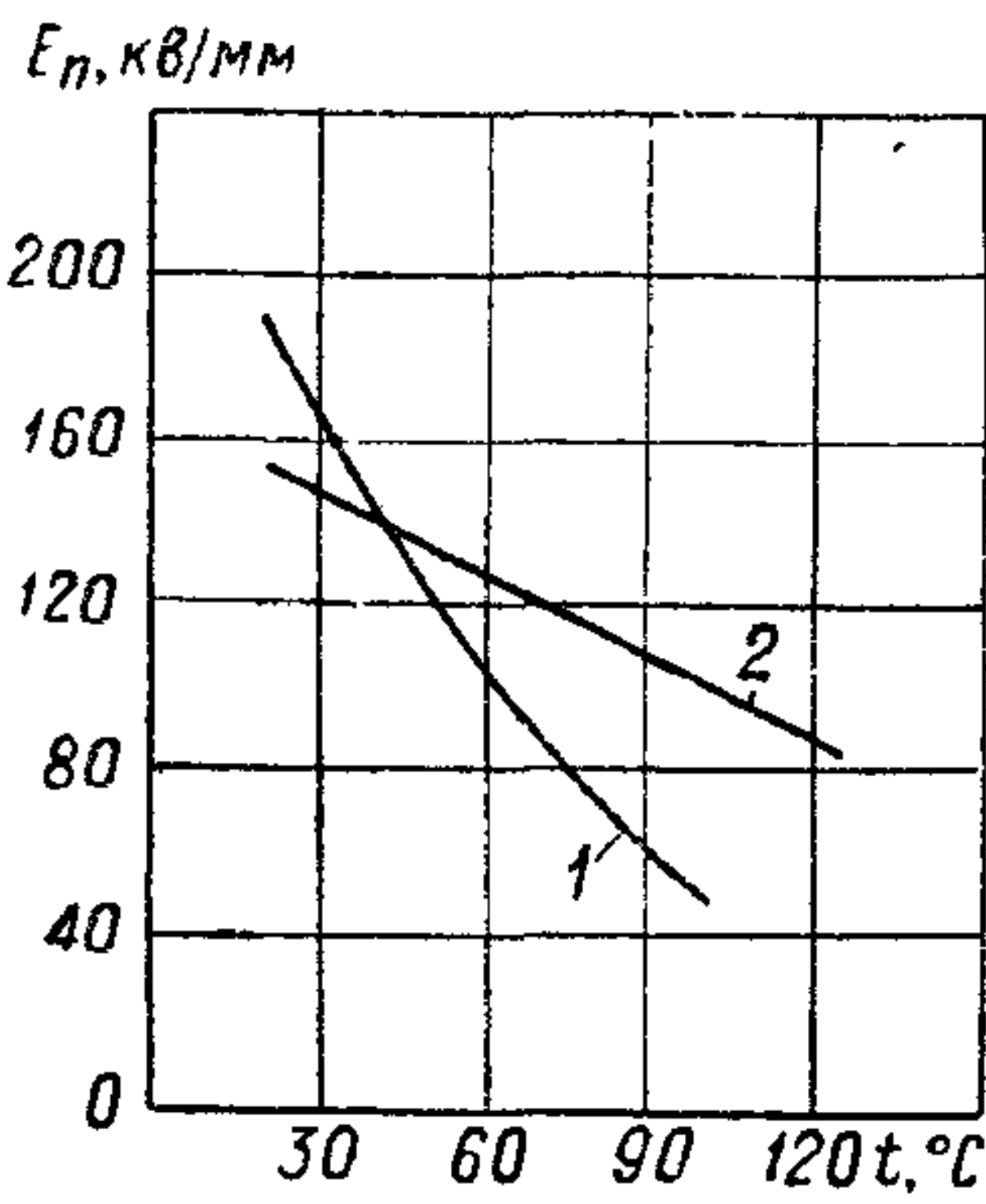


Рис. 93. Зависимость ионизирующей напряженности при постоянном напряжении от температуры для бумажных конденсаторов, пропитанных маслом (1) и пропитанных октолом (2).

диапазон значений: от 4 до 15. Г. С. Кучинский нашел из опыта, что средняя мощность ионизации

$$P_q = qN_q U_{\text{и}} = I_q U_{\text{и}}, \quad (152)$$

где q — регистрируемый заряд импульса; n — число импульсов за 1 сек; $U_{\text{и}}$ — напряжение начальной ионизации; I_q — импульсный ток, связана с приложенным напряжением такой же степенной зависимостью (151), как и срок службы, причем $n = 6$. Это придает определенное физическое обоснование формуле (151). Вместе с тем, если положить в ней $\tau = \infty$, то U должно стремиться к нулю. Однако из рассмотренного выше механизма данного вида старения можно думать, что бесконечно большой срок службы должен быть получен не при $U = 0$, а при напряжении начальной ионизации, так как, если ионизация не будет иметь места, то и старение должно отсутствовать. Поэтому формулу (151) иногда видоизменяют так:

$$\tau = \frac{A}{(U - U_{\text{и}})^n}. \quad (153)$$

Тем не менее и в таком виде эта эмпирическая зависимость пригодна лишь для самых ориентировочных подсчетов как вследствие недостаточной определенности величины n , так и величины $U_{\text{и}}$. Японские исследователи при изучении старения макетов силовых бумажных конденсаторов, пропитанных хлорированными массами, при толщине диэлектрика в пределах от 30 до 250—275 $\mu\text{м}$, для пределов времени от нескольких минут до 10^4 мин (168 ч) установили следующую эмпирическую зависимость между напряжением и сроком службы:

$$U = U_0 \left(1 + \frac{a}{\sqrt[4]{\tau}} \right),$$

где τ — срок службы в мин, а коэффициент a равен 0,46 при пропитке трихлордифенилом и 0,41 — при пропитке пентахлордифенилом. Величина U_0 представляет собой значение напряжения, соответствующего бесконечно большому сроку жизни. Однако промежуток времени, для которого эта формула проверена экспериментально, недостаточно велик для того, чтобы результаты расчета можно было бы экстраполировать на реальные сроки службы силовых конденсаторов.

Очевидно, что заполнение пор в изоляции конденсатора жидким диэлектриком возможно лишь в том случае, когда они носят открытый характер. При изготовлении керамических конденсаторов стремятся свести к минимуму открытую пористость, чтобы обеспечить достаточную влагостойкость конденсатора; однако устранить закрытую пористость полностью не удается, что создает опасность развития ионизационных явлений в диэлектрике керамического конденсатора (рис. 61, б, выше). Однако в этом случае характер ионизационного пробоя должен резко отличаться от того

вида пробоя, который мы рассмотрели выше применительно к системе из пористого органического диэлектрика и изоляционной жидкости.

А. З. Пирятинский¹ высказал идею, что ионизационный пробой керамики связан с механическим разрушением образца, вызванным температурными напряжениями в диэлектрике при местном разогреве пор развивающейся в них ионизацией. Этот вид пробоя был назван сначала термоионизационным, позже электротермомеханическим. Для описания зависимости электрической прочности при этом виде пробоя от частоты и толщины образца была предложена формула

$$E_{\text{пр}} = k_1 \sqrt[3]{\frac{\sigma_{\text{сж}} \lambda}{\alpha_{\text{л}} M f a^2}} = k_2 \sqrt[3]{\frac{\sigma_{\text{сж}} \lambda}{\alpha_{\text{л}} M f d^2}} = \frac{A}{\sqrt[3]{f d^2}} [\text{кв/см}], \quad (154)$$

где $\sigma_{\text{сж}}$ — временное сопротивление сжатию в кГ/см^2 ; λ — коэффициент теплопроводности диэлектрика в $\text{вт/см} \cdot \text{град}$; $\alpha_{\text{л}}$ — коэффициент линейного расширения в град^{-1} ; M — модуль упругости в кГ/см^2 ; f — частота в гц ; a — радиус сферической поры в см ; d — толщина образца в см ; k_1, k_2, A — коэффициенты пропорциональности.

Переход от модификации этой формулы, содержащей радиус поры a , к модификации, содержащей толщину диэлектрика d , был основан на допущении о том, что с увеличением толщины образца увеличивается вероятность нахождения в нем пор большого радиуса. Формула (154) позволила получить качественное объяснение характера зависимости электрической прочности керамики от частоты и толщины образца (рис. 94). Для области радиочастот было получено и удовлетворительное количественное совпадение, причем значения коэффициента A были найдены равными: для ультрафарфора — 1030, для радиостеатита — 1120, для тиконда Т80—865 и для тиконда Т150—850. Однако для широкого диапазона частот, например, при переходе от радиочастоты к частоте 50 гц , формула (154) не дала удовлетворительного совпадения расчета с опытом. Дополнительный анализ этого вопроса показал, что энергия, выделяемая при ионизации в порах керамики, может быть достаточной для развития этого вида пробоя только при диаметре пор порядка 1 мм , которые при современном уровне технологии могут встречаться только у заведомо дефектных образцов (например, для керамики Т150 петрографический анализ дает значение порядка 20 мкм в качестве наиболее типичного для крупных пор).

Ю. М. Волокобинским² было показано, что причину нарушения механической прочности керамики, приводящего к ее пробоя, следует искать не в ионизации газа в порах, а в механических

¹ А. З. Пирятинский. — ЖТФ, 1952, XXII, вып. 1957.

² Ю. М. Волокобинский. — ДАН СССР, 1962, 144, 6, с. 1285—1288.

напряжениях, возникающих из-за различия температуры между нагретыми центральными слоями керамического диэлектрика и более холодной поверхностью конденсатора. При таком характере

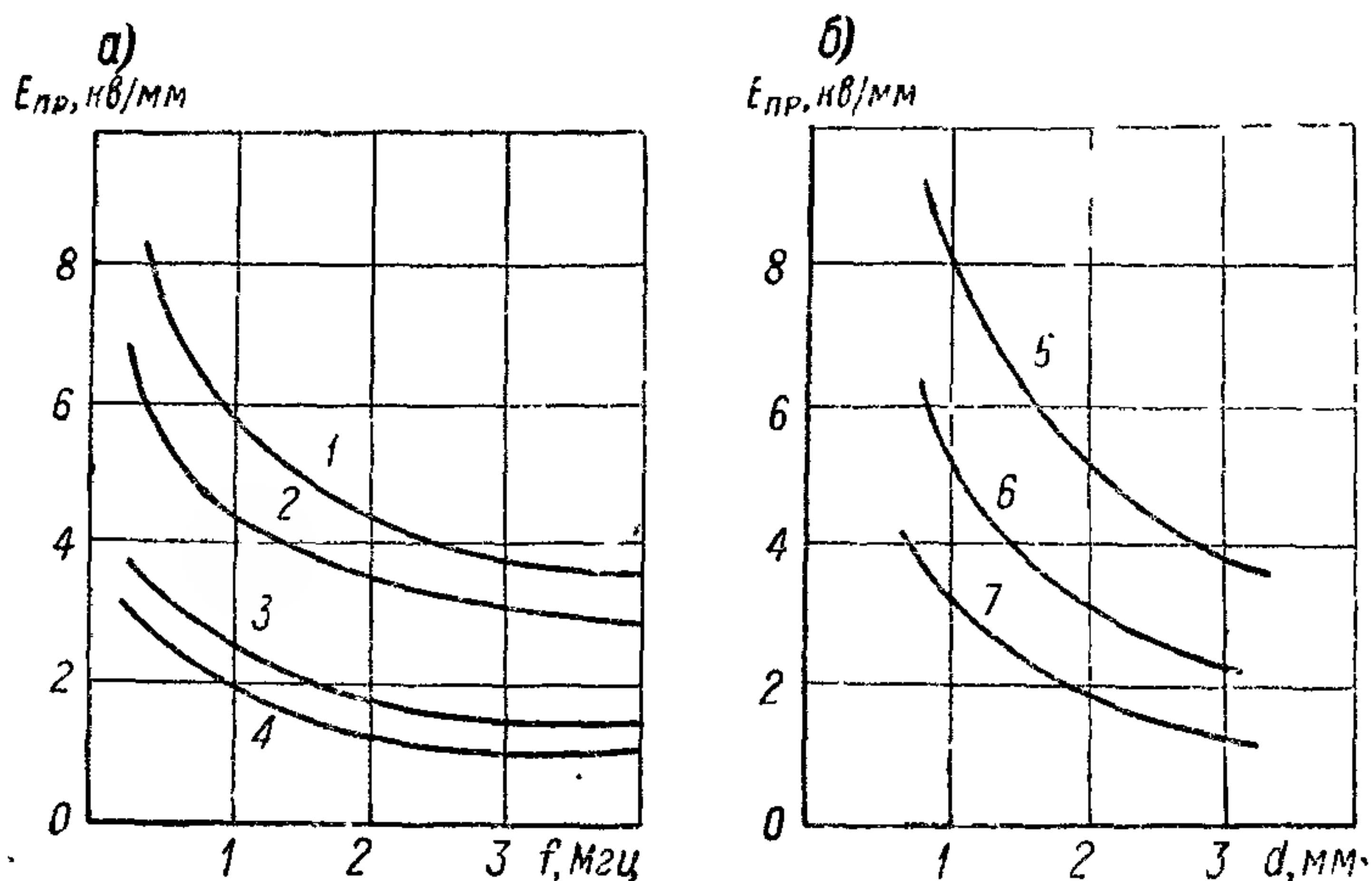


Рис. 94. Зависимость электрической прочности образцов радиокерамики от частоты (а) и от толщины образцов (б).

1 — ультрафарфор, 0,8 мм; 2 — тиконд Т150, 0,8 мм; 3 — ультрафарфор, 2,8 мм; 4 — тиконд Т80, 2,8 мм; 5, 6, 7 — радиостеатит (5 — 0,15 МГц, 6 — 1 МГц, 7 — 5 МГц).

механизма пробоя эффект старения керамических конденсаторов под действием переменного напряжения можно объяснить статической усталостью материала при воздействии механической нагрузки. Этот вид пробоя предложено называть термоупругим.

§ 36. Электрохимический пробой

При длительном действии постоянного напряжения, особенно в условиях повышенной температуры окружающей среды, в диэлектрике конденсатора возникают электрохимические явления, которые могут привести к его разрушению и установлению короткого замыкания между обкладками, т. е. к пробое. Это обусловлено тем, что проводимость диэлектриков носит обычно ионный характер и ток утечки, протекающий через диэлектрик, имеет электролитическую природу, т. е. связан с переносом ионов.

Неметаллические ионы, разряжаясь у обкладок, могут образовывать химически активные вещества, взаимодействующие с диэлектриком; металлические ионы, разряжаясь у обкладок, могут образовывать проводящие дендриты, прорастающие от обкладок в толщу диэлектрика и сокращающие его рабочую толщину. Могут иметь место также случаи взаимодействия атомов металла, образующихся при разрядке ионов, с диэлектриком, в частности,

восстановление некоторых диэлектрических окислов с превращением их в полупроводники.

Повышение температуры увеличивает проводимость диэлектрика, т. е. количество переносимых ионов; кроме того, при повышении температуры ускоряются химические реакции; в связи с этим электрохимическое старение диэлектрика идет значительно быстрее и срок жизни конденсатора резко сокращается. Электрохимическое старение характерно в первую очередь для органических диэлектриков ввиду их меньшей химической стойкости по сравнению с неорганическими. Первые работы по изучению этого вида старения были проведены для бумажных конденсаторов, пропитанных хлорированными

массами: хлорнафталином (галоваксом) и пентахлордифенилом. Внешними признаками старения в этом случае являлись: возрастание тока утечки с течением времени, т. е. возрастание проводимости диэлектрика (рис. 34, а, выше), коррозия алюминиевой фольги (особенно заметная для положительной обкладки) и появление на бумаге темных пятен коричневатой окраски, заметно флюоресцирующих при освещении бумаги ультрафиолетовым светом. Американские исследователи¹ дали этому явлению следующее объяснение. Следы HCl , неизбежно присутствующие в хлорированных полярных массах, при постоянном напряжении диссоциируют, и отрицательно заряженные ионы хлора двигаются к положительной обкладке; атомы хлора, освобождающиеся при разрядке ионов у обкладки, вступают в реакцию с алюминием обкладки и образуют хлористый алюминий AlCl_3 , активный катализатор разложения хлорированных масс. Его взаимодействие с пропиточной массой приводит к отщеплению новых порций HCl , которые также диссоциируют и т. д. (рис. 95). Накопление в бумаге увеличивающихся количеств HCl и хлора постепенно увеличивает проводимость и приводит к местным разрушениям клетчатки (коричневые пятна); на одном из разрушенных участков происходит пробой.

Для ослабления процесса старения было предложено использовать стабилизатор—антрахинон $\text{C}_6\text{H}_4 - (\text{C}=\text{O})_2 - \text{C}_6\text{H}_4$ в количестве 0,25—0,5%. Положительный эффект от добавки стабилизатора (рис. 96, а и б) сначала объяснили образованием защитной пленки на поверхности обкладки, а затем — способностью антрахинона образовывать комплексные соединения с хлором,

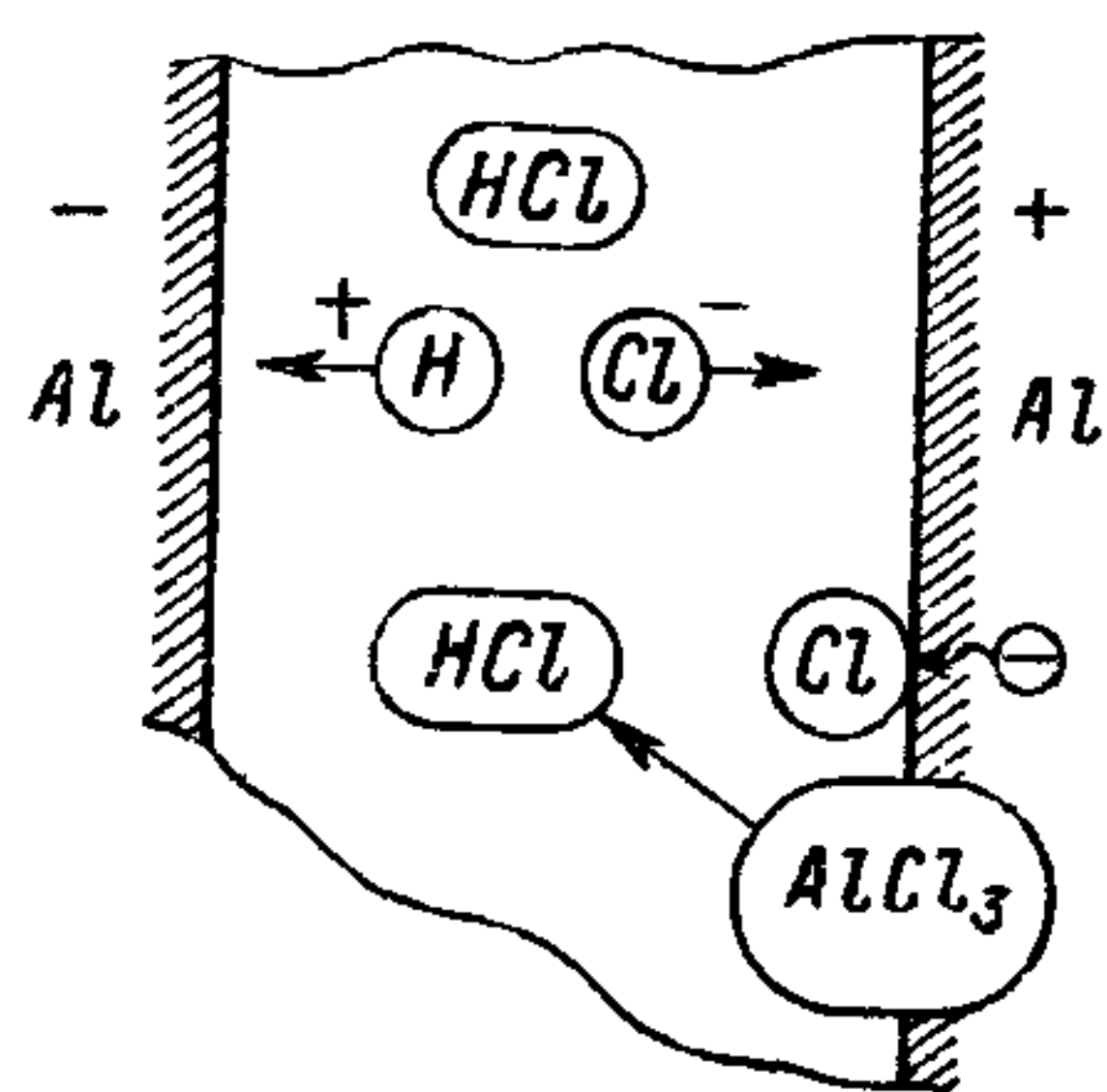
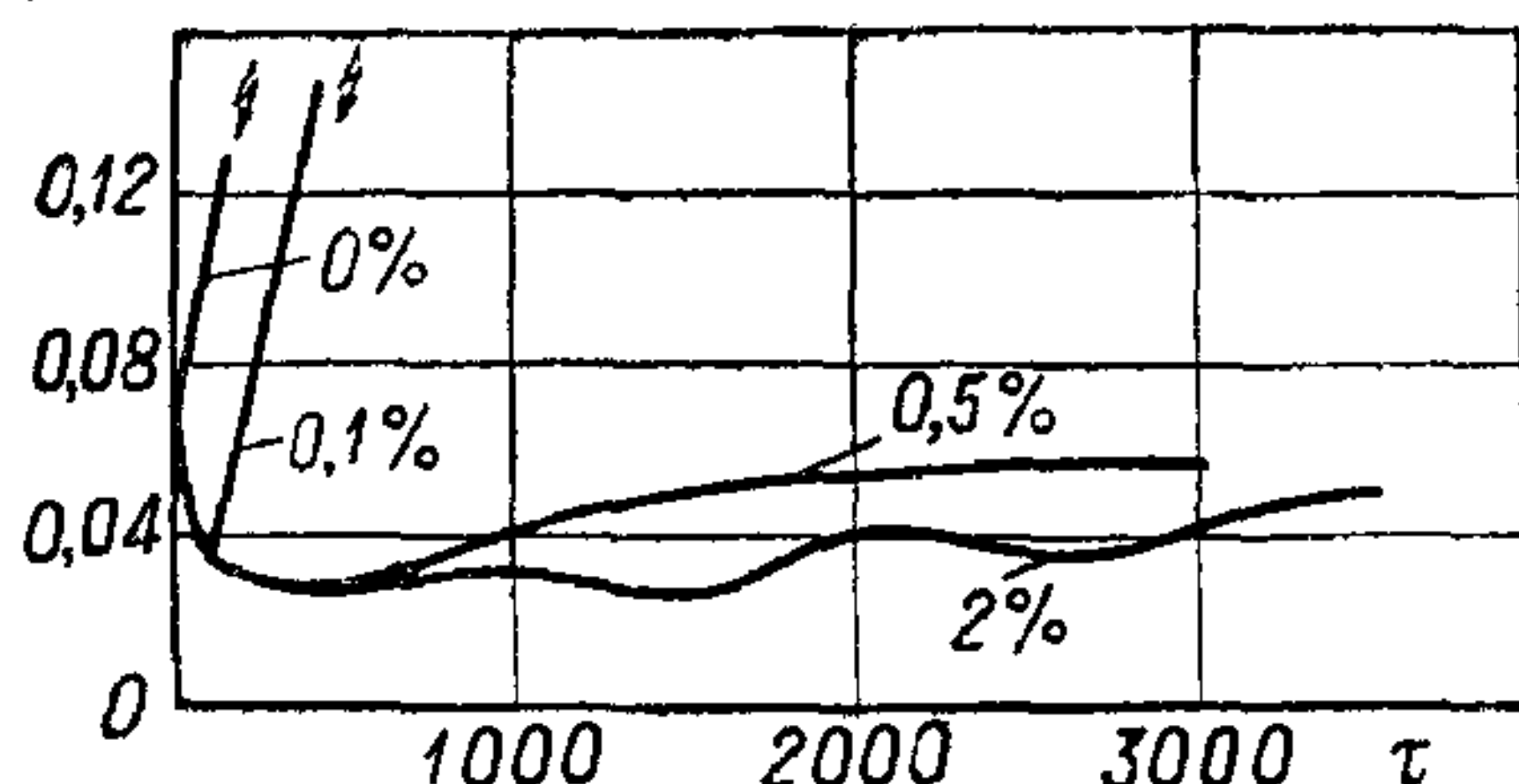


Рис. 95. Схема развития электрохимического пробоя в бумажном конденсаторе с алюминиевыми обкладками, пропитанном хлорированной массой.

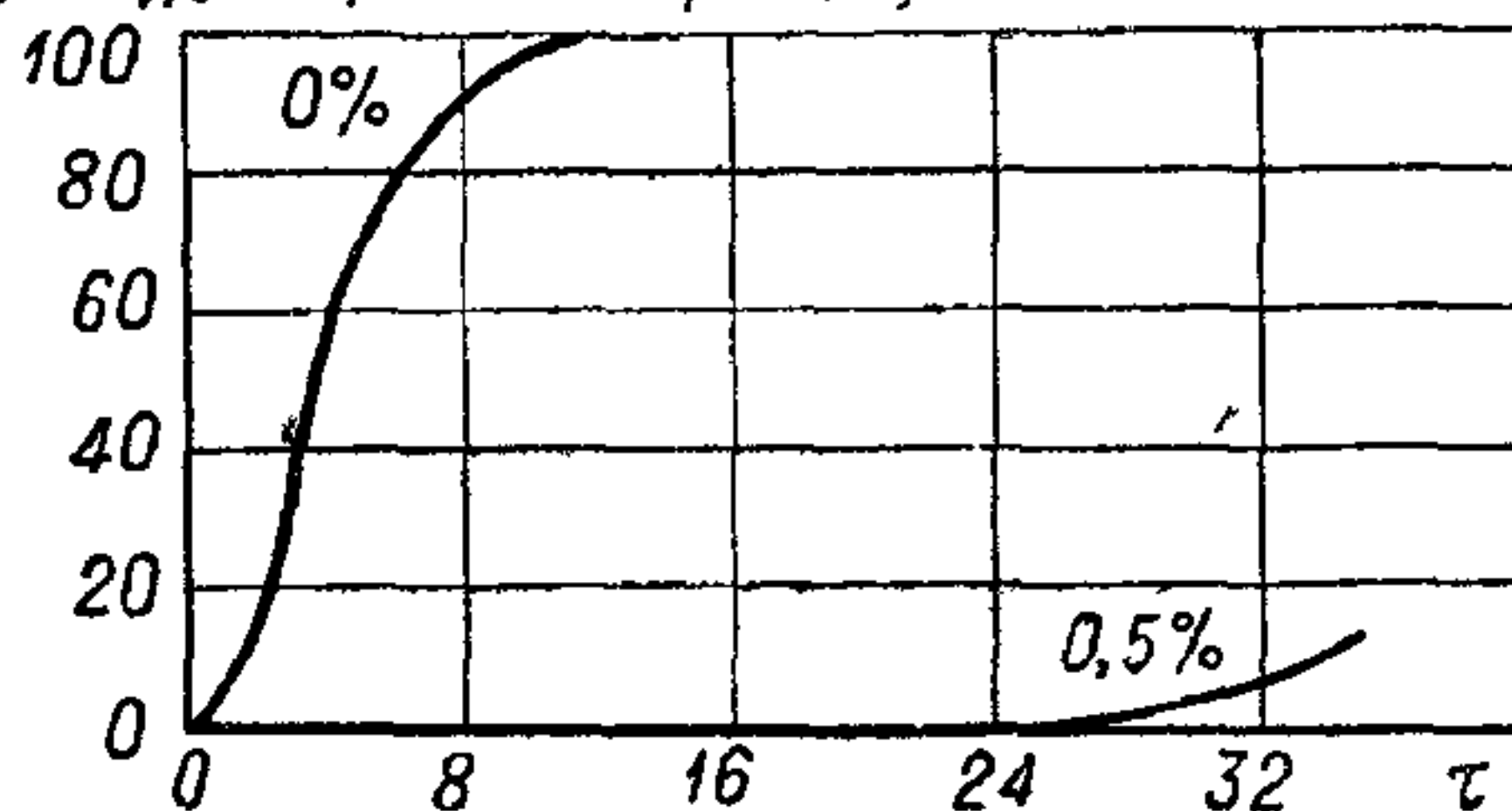
¹ D. Mc. Lean, G. Kohman, L. Egerton, W. Brotherton. — «Ind. and Eng. Chemistry», 1942, 34, № 1, 101.

связывающие хлор, выделяющийся при распаде хлорированной массы. Поскольку начальное содержание свободного хлора мало, для его связывания и сильного торможения процесса последую-

а) $1/R_{из}$



б) М, % Время старения, часы



в) М, % Время старения, месяцы

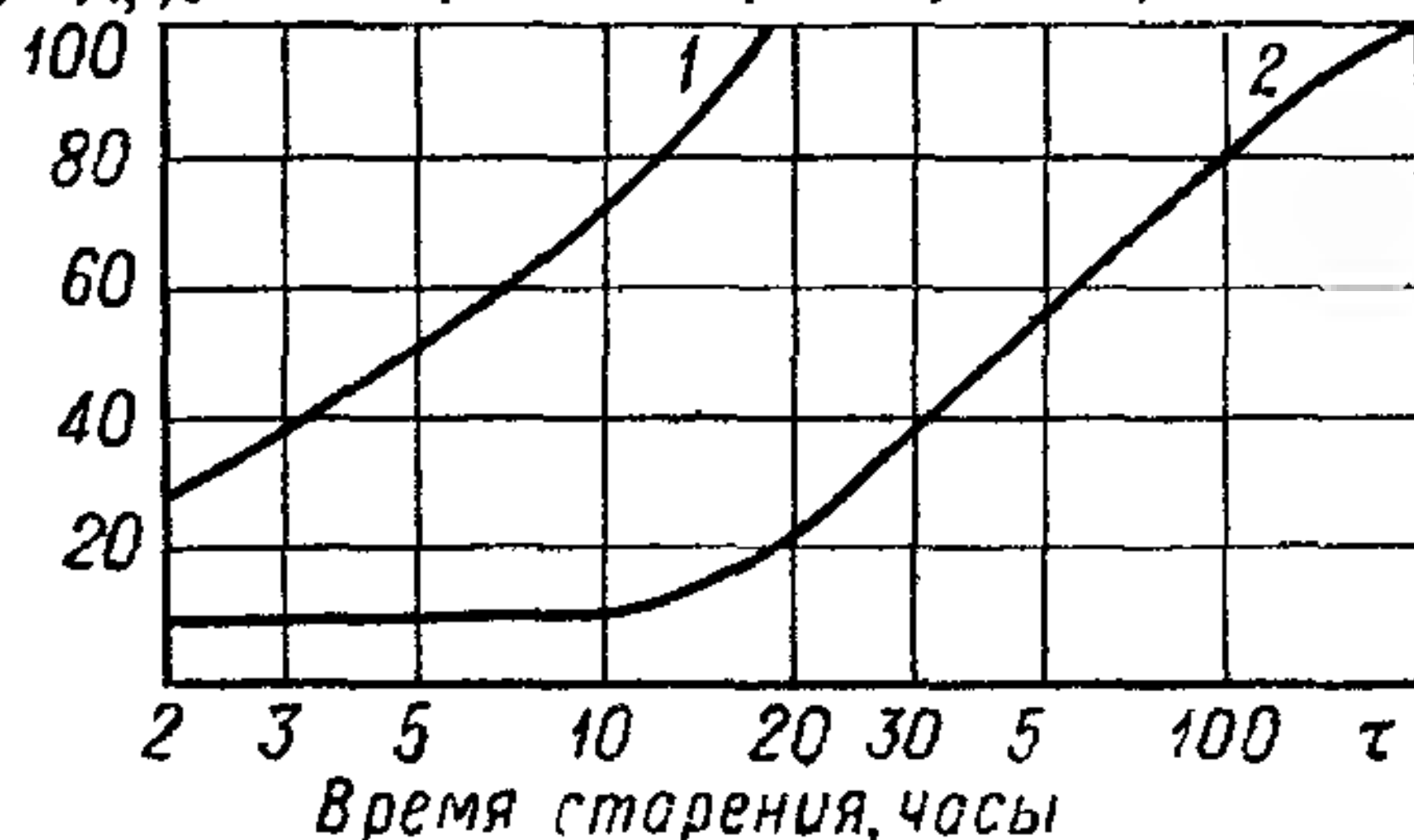


Рис. 96. Старение бумажных конденсаторов, пропитанных хлорированными массами, при постоянном напряжении: а — зависимость проводимости диэлектрика конденсатора от времени старения при различных количествах добавленного стабилизатора; б — зависимость интегральной вероятности пробоя от времени старения при отсутствии и при наличии добавки стабилизатора; в — зависимость интегральной вероятности пробоя от времени старения при обычной фольге (1) и при лакированной (2).

покрывать обкладки тонким слоем копалового лака, затрудняющим контакт приходящих к обкладкам ионов с металлом обкладок (рис. 96, в).

щего распада достаточно применять относительно малые добавки стабилизатора. Благоприятное влияние добавки антрахинона подтвердилось в работах советских и польских исследователей.

Исследователи, работавшие в Англии¹, пришли к выводу, что роль стабилизатора сводится не к связыванию хлора, а к связыванию свободного водорода, образующего с антрахиноном соединение, называемое оксантазолом: $C_6H_4(COH)_2C_6H_4$, следы которого действительно были найдены в бумажных конденсаторах с хлорированной пропиткой, стабилизированных антрахиноном. Кроме антрахинона, в качестве стабилизаторов для хлорированных пропиточных масс были опробованы азобензол, нитробензол и т. п. Был предложен также в качестве стабилизатора ненасыщенный углеводород: $C_{18}H_{36}$ — октадецилен, связывающий водород и не дающий ему возможности, соединясь с хлором, образовывать HCl (предполагается, что в исходной массе содержится свободный хлор).

В Японии предложили для увеличения срока службы конденсаторов, пропитанных хлорированной массой,

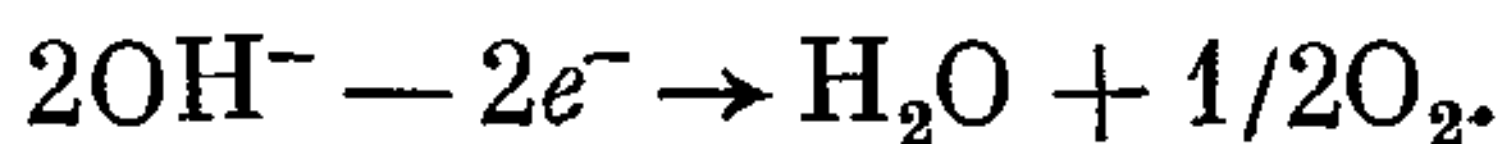
¹ Н. F. Church, C. G. Garton. — «Nature», 1948, 162, № 4112, p. 301.

Вопрос об электрохимическом старении бумажных конденсаторов, пропитанных неполярными углеводородными массами: церезином, вазелином, маслом или октолом, еще мало изучен. Можно думать, что в данном случае роль активных загрязнений, способных вызвать разрушение бумаги, могут играть содержащиеся в ней следы хлоридов и сульфатов. Кроме того, химическое воздействие на бумагу или пропиточную массу могут оказывать активный кислород и водород, образующиеся при электролизе остаточной воды. При этом выделяющийся на катодной обкладке водород может вызывать процесс гидрогенизации диэлектрика, прилегающего к этой обкладке, а кислород, выделяющийся у анода, может вызывать окислительные процессы. Скопление этих газов у поверхности обкладок может также создавать очаги ионизации, способствующие развитию ионизационного старения. Известную роль в процессе электрохимического старения при углеводородных пропиточных массах может играть и материал обкладок (рис. 34, б и в, выше).

Интересные данные о появлении коррозии на обкладках бумажных конденсаторов с неполярной углеводородной пропиткой были приведены Кристенсеном¹. Это явление объясняется следующим образом. В процессе электролиза остаточной воды у катода выделяется газообразный водород и образуются гидроксильные ионы:



У анода происходит выделение кислорода, окисляющего обкладку:



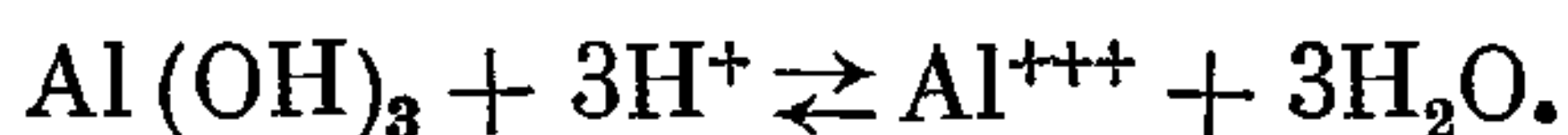
У катода идет далее вторичная реакция взаимодействия алюминия с водой, при которой образуется гидрат окиси алюминия и выделяются дополнительные количества газообразного водорода:



Одновременно может идти процесс поглощения гидроксидов гидратом окиси алюминия:



При наличии на аноде гидроокиси алюминия, образованной в процессе окисления, у анода также может идти вторичная реакция взаимодействия гидроокиси алюминия с ионами водорода, при которой образуются трехвалентные ионы алюминия и выделяется вода, снова подвергающаяся электролитическому разложению:



¹ Н. Kroman Kristensen. — «Trans. Danish Acad. Techn. Sc.», 1949, № 6, 3.

При испытании увлажненных непропитанных секций бумажных конденсаторов с алюминиевыми обкладками при постоянном напряжении было обнаружено появление на обкладках полупроводящего слоя гидроокиси алюминия. Было высказано предположение, что разогрев этого слоя токами утечки может привести к местному термическому разрушению бумаги и последующему пробое конденсатора.

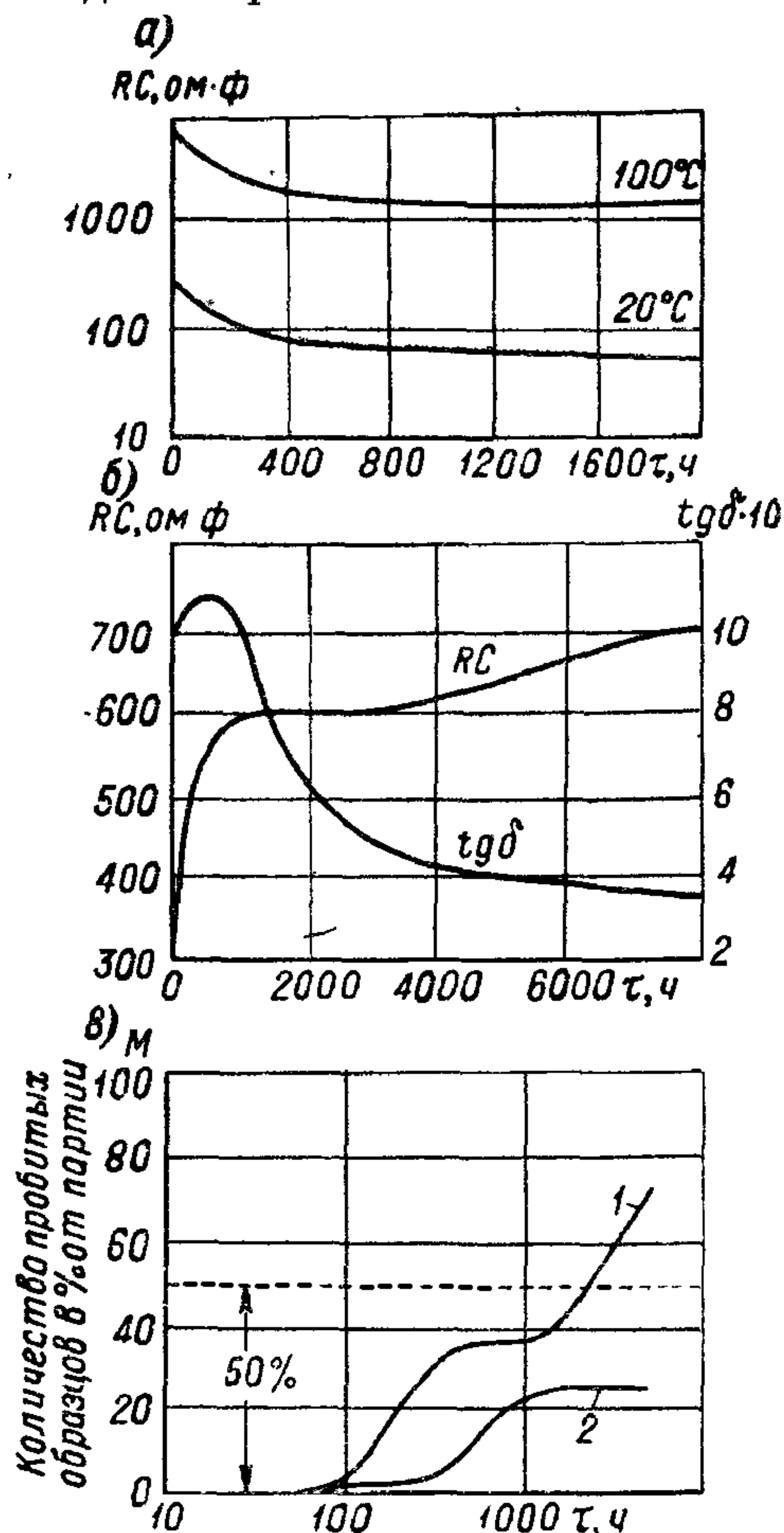


Рис. 97. Старение бумажных конденсаторов при постоянном напряжении: а — изменение постоянной времени конденсаторов, пропитанных вазелином, со временем старения (измерение при 20 и 100°C); б — зависимость постоянной времени и угла потерь конденсаторов, пропитанных касторовым маслом, от времени старения; в — зависимость интегральной вероятности пробоя от времени старения для конденсаторов с одинаковой толщиной диэлектрика, пропитанных вазелином (1) и пропитанных касторовым маслом (2); режим испытания: 100°C , 800 в.

Следует иметь в виду, что окислительные процессы, происходящие в диэлектрике бумажного конденсатора при его старении, могут также служить источником дополнительного выделения воды за счет отщепления гидрокислых групп в процессе окислительной деструкции молекул целлюлозы.

В отличие от конденсаторов, пропитанных хлорированными массами, показывающими прогрессивное ухудшение электрических свойств перед их пробоем в результате длительного старения, конденсаторы, пропитанные неполярными углеводородными массами, или вовсе не изменяют электрических свойств в процессе старения, или же дают некоторое начальное ухудшение с последующим установлением постоянного значения наблюдаемой характеристики (рис. 97, а). Это можно объяснить тем, что некоторое начальное ухудшение диэлектрика в герметизированных конденсаторах обусловлено окислительными процессами за счет небольшо-

го количества остаточного воздуха, находящегося под крышкой конденсатора. Когда кислород, содержащийся в этом объеме

воздуха, будет израсходован, дальнейшее окисление прекращается и электрические свойства стабилизируются. Ухудшение сопротивления изоляции конденсатора при окислении углеводородной пропиточной массы объясняется переходом некоторой части предельных углеводородов, входящих в состав пропиточной массы, в органические жирные кислоты:



Наличие в органических кислотах карбоксильной группы — COOH обуславливает их способность к диссоциации, хотя последняя и много меньше, чем у минеральных кислот. При диссоциации органических кислот освобождаются ионы водорода, принимающие участие в процессе проводимости, и сопротивление изоляции конденсатора снижается.

Интересные явления были получены при изучении старения бумажных конденсаторов, пропитанных касторовым маслом, которое представляет собой глицерид рицинолевой кислоты: $C_{17}H_{32}OH COOH$. Вследствие наличия в этом масле двойной связи и карбоксильной группы, свидетельствующей о способности к диссоциации, оно должно было бы быть менее устойчивым веществом, чем неполярные углеводородные массы, и давать ухудшенные значения электрических характеристик пропитанных им конденсаторов. Действительно, бумажные конденсаторы, пропитанные касторовым маслом, имеют пониженную постоянную времени и повышенный $\lg \delta$ в сравнении с конденсаторами, пропитанными неполярными углеводородными жидкостями или даже полярными хлорированными массами. Однако при длительном воздействии постоянного напряжения и повышенной температуры у этих конденсаторов наблюдается постепенное повышение постоянной времени и снижение угла потерь (рис. 97, б), причем срок службы их оказывается выше, чем при пропитке некоторыми неполярными углеводородными массами (рис. 97, в). Как было установлено В. И. Карабановым, это явление связано с появлением на обкладках конденсатора (преимущественно на анодной) тонкого слоя твердого вещества, образующегося при химическом перерождении пленки масла, прилегающей к обкладке, под действием постоянного электрического поля и повышенной температуры. Эта пленка затрудняет контакт свободных ионов с металлом обкладки и образует на их пути барьер, снижающий ток утечки и потери в конденсаторе. Получается тот же эффект, который японцы достигали, покрывая обкладки специальным лаком (рис. 96, в, выше).

В процессе старения бумажных конденсаторов химические изменения происходят не только в пропиточной массе, но и в бумаге, хотя это, может быть, труднее заметить. Наряду с окислением целлюлозы (основы бумаги), которое относительно не так опасно, может происходить процесс гидролитического распада

целлюлозных молекул, связанный с разрывом молекулярных цепей и потерей механической прочности, что приводит в конечном счете и к снижению электрической прочности. По-видимому, воздействие электрического поля может оказывать влияние на ход этого процесса. Было также показано, что процесс старения бумажных конденсаторов при постоянном напряжении заметно ускоряется при их загрязнении такими примесями, как канифоль или битум (попадающими в пропиточную массу при пайке контактов или при заливке конденсатора битумным влагозащитным компаундом).

Можно предполагать, что идея стабилизации пропиточных масс, которая была успешно применена для замедления процесса старения конденсаторов, пропитанных хлорированными массами, может быть распространена и на другие типы пропиточных масс, однако по этому вопросу пока еще трудно привести конкретные рекомендации.

Вопрос о механизме электрохимического старения пленочных конденсаторов еще мало изучен. Можно думать, что для неполярных пленок с очень высоким удельным сопротивлением, благодаря сильному снижению токов утечки, даже при повышенных температурах электрохимические явления должны быть резко ослаблены, а потому едва ли могут проявиться сколько-нибудь заметно. В конденсаторах из полярных синтетических пленок можно ожидать электрохимического старения с большими основаниями. Действительно, при изучении старения триацетатных конденсаторов было установлено, что это явление связано с разложением триацетата целлюлозы при действии температуры 100°C и постоянного электрического поля с выделением свободной уксусной кислоты. Имеются указания, что старение полиэтилентерефталатной пленки, как и старение бумаги, связано с явлениями гидролитического распада. Применение пленки из полиэфира, близкого к полиэтилентерефталату, но обладающего большей стойкостью к гидролизу (терафилм), позволило заметно улучшить срок службы конденсаторов, т. е. замедлить процесс старения.

В случае конденсаторов с неорганическим диэлектриком электрохимическое старение носит иной характер, чем в бумажных или пленочных конденсаторах. Для стеклянных и стеклоэмалевых конденсаторов, особенно в случае наличия в составе стекла щелочных ионов (Na^+ , K^+), отличающихся большой подвижностью, при работе в условиях воздействия постоянного напряжения и повышенной температуры следует опасаться прорастания металлических дендритов от отрицательного электрода вглубь диэлектрика; эти дендриты образуются атомами металла, откладывающимися у отрицательной обкладки при разрядке подходящих к ней катионов. При этом сокращается рабочая часть толщины диэлектрика, что должно приводить к пробое по истечении некоторого времени с момента включения

конденсатора под напряжение (рис. 98). В данном случае источником появления металлических катионов служит сам диэлектрик. Как было показано выше (гл. 4, § 22), в некоторых случаях источником катионов, попадающих в диэлектрик, служит обкладка, в частности, при использовании металлизации диэлектрика серебром. При этом, как отмечалось, происходит своеобразный процесс старения титановой керамики, при котором часть объема диэлектрика превращается в полупроводник за счет восстановления TiO_2 серебром (рис. 36, выше). Процессу образования катионов серебра, способных мигрировать по поверхности диэлектрика или проникать в его толщу, способствует наличие повышенной влажности:



В частности, миграция серебра по поверхности слюды может служить одной из причин старения слюдяных конденсаторов.

Явления старения при длительной работе при постоянном напряжении в случае электрических алюминиевых конденсаторов обычно связаны не столько с изменениями в диэлектрике (оксидном слое), сколько с изменениями в электролите, который играет роль одной из обкладок конденсатора. Эти конденсаторы обычно выходят из строя не вследствие пробоя диэлектрика, а вследствие снижения емкости и роста угла потерь, вызванных увеличением сопротивления рабочего

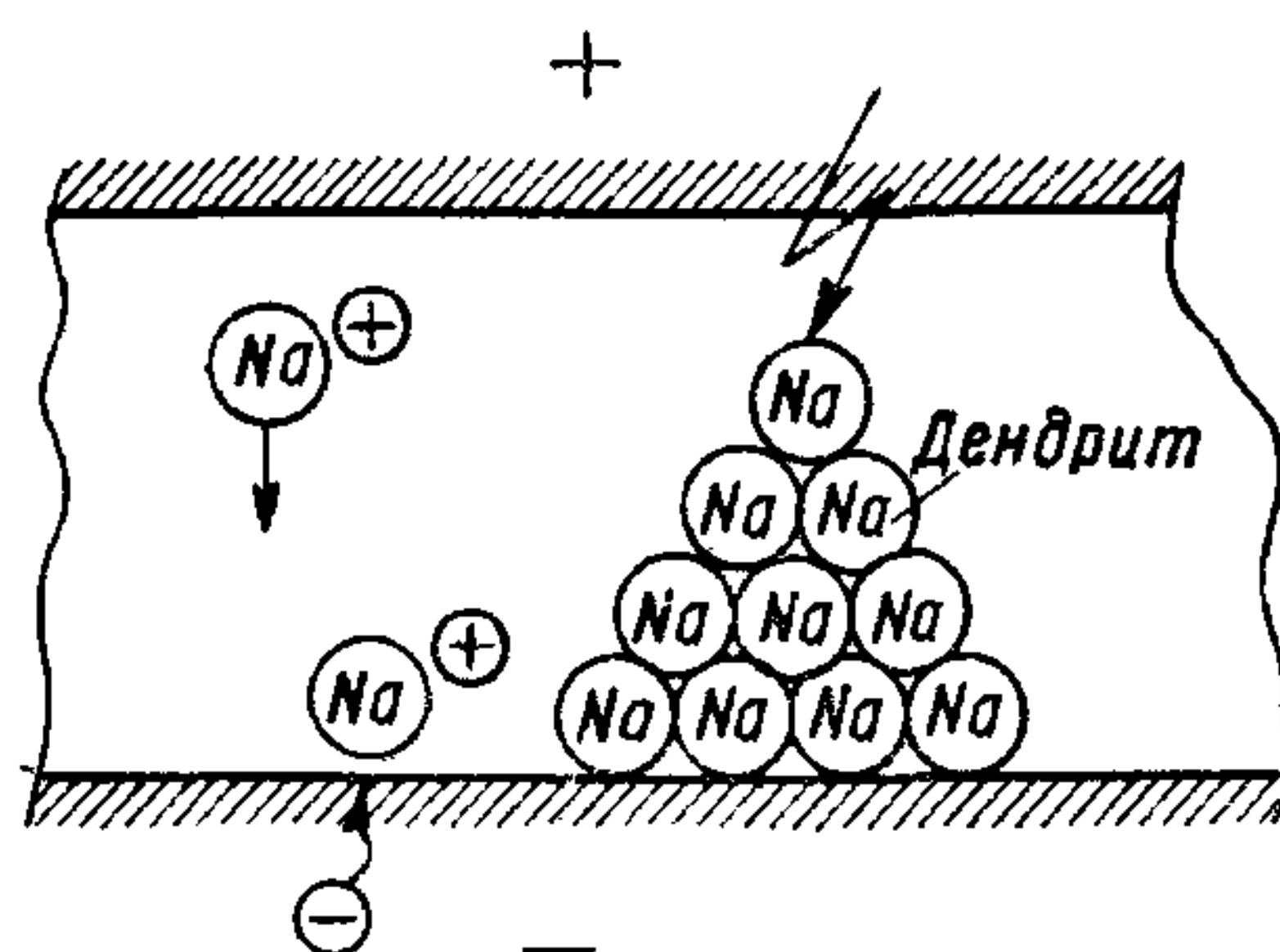


Рис. 98. Схема развития электрохимического пробоя в неорганическом диэлектрике, содержащем одновалентные катионы.

электролита, в связи с потерей летучих компонентов. Однако при использовании вместо алюминия других вентильных металлов, например тантала или ниобия, явление старения может иметь другую природу. Оксидный слой на этих металлах имеет аморфный характер, однако при воздействии электрического поля в отдельных его участках может начаться процесс кристаллизации. На этих участках по мере роста объема кристаллов нарушается сплошность аморфного оксидного слоя (рис. 99) и происходит резкое возрастание тока утечки, заканчивающееся пробоем. Таким образом, и в некоторых типах электролитических конденсаторов могут развиваться длительные процессы старения, приводящие к потере электрической прочности диэлектрика, как и в конденсаторах с твердым органическим или неорганическим диэлектриком.

Процесс электрохимического старения ускоряется при увеличении напряжения, приложенного к конденсатору, и при повышении температуры окружающей среды. Зависимость срока службы конденсаторов от напряже-

и я при электрохимическом старении обычно характеризуют такой же степенной зависимостью (151), как и при ионизационном старении. Однако вопрос о ее замене зависимостью (153), предусматривающей определенный нижний предел напряжения, при котором старение прекращается и срок жизни конденсатора стремится к бесконечности, при электрохимическом старении не ставится. В этом случае такой предел, каким при ионизационном старении является напряжение начала ионизации, отсутствует и при увеличении времени до бесконечности пробивное напряжение должно стремиться к нулю.

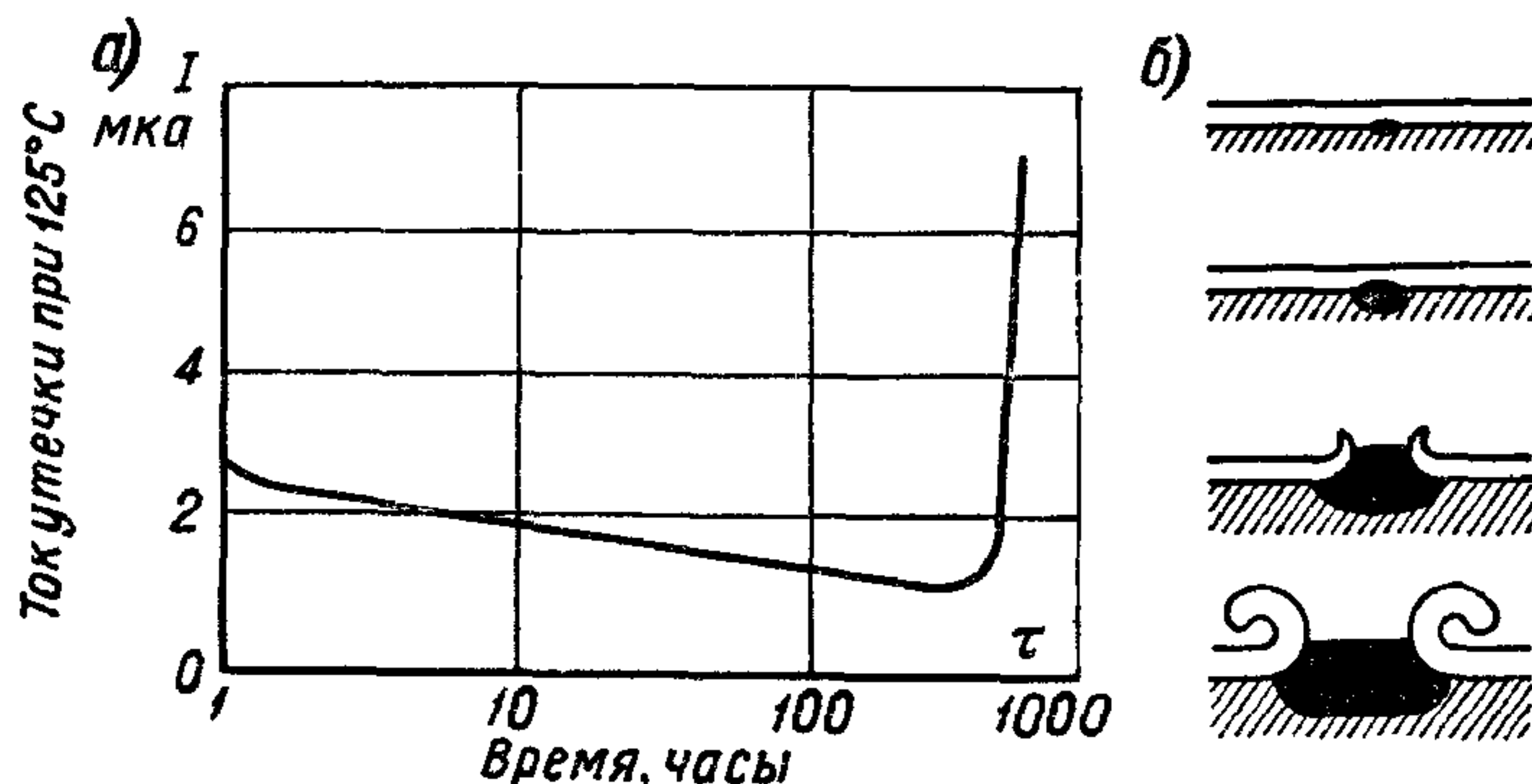


Рис. 99. Старение электролитических танталовых конденсаторов: *a* — зависимость тока утечки от времени старения при 125° С и напряжении 300 в; *б* — схема развития кристаллизации, разрушающей аморфный оксидный слой.

В ряде работ по изучению старения конденсаторов при постоянном напряжении, т. е. электрохимического старения, выражению (151) придавали вид:

$$E_{\text{пр}} = \frac{A'}{\tau^m} = A' \cdot \tau^{-m}. \quad (155)$$

В этом случае, очевидно, $m = \frac{1}{n}$, где n — показатель степени в формуле (151). Формула (155) является отражением обычного представления о зависимости электрической прочности от времени приложения напряжения и характеризует процесс старения как снижение $E_{\text{пр}}$ (или $U_{\text{пр}}$) в процессе эксплуатации конденсатора. Однако, как будет показано в § 37, правильнее говорить о зависимости срока службы конденсатора от приложенного напряжения, т. е. пользоваться для оценки явления старения формулой (151), хотя математически обе формулы равноценны. Часто принимают величину $n \approx 5$ (т. е. $m \approx 0,2$). Разброс этой величины указан в табл. 5, ниже.

Влияние температуры на процесс старения при постоянном напряжении обычно характеризуется зависимостью срока службы конденсатора от температуры

(при неизменном значении приложенного напряжения). Эту зависимость выражают различными формулами.

Ранее часто указывалась зависимость вида

$$\tau = A \cdot 10^{\frac{B}{T}}, \quad (156)$$

где T — абсолютная температура в $^{\circ}\text{K}$, а $B = 5000 \div 5500$ (для бумажных конденсаторов). При пересчете сроков службы, полученных при одной температуре, к срокам службы при другой температуре иногда пользовались формулой

$$\lg \tau_1 - \lg \tau_2 = \beta (t_2 - t_1), \quad (157)$$

где τ_1 — срок службы при температуре $t_1^{\circ}\text{C}$, а τ_2 — при $t_2^{\circ}\text{C}$; коэффициент β для бумажных конденсаторов рекомендовалось принимать равным 0,03—0,04, т. е. то же значение, что и в эмпирической формуле (57).

Поскольку процессы электрохимического старения связаны с развитием в диэлектрике тех или иных химических реакций, для выражения зависимости срока службы от температуры можно применить закон Аррениуса о зависимости скорости химических реакций от температуры, согласно которому скорость реакции должна удваиваться при повышении температуры на каждые 10°C . В этом случае, используя обозначения формулы (157), можно написать:

$$\tau_1 = \tau_2 \cdot 2^{\frac{t_2 - t_1}{10}}. \quad (158)$$

Однако, учитывая отклонения от закона Аррениуса, этой формуле часто придают такой вид:

$$\tau_1 = \tau_2 \cdot 2^{\frac{t_2 - t_1}{k}} \quad \text{или} \quad \tau_1 = \tau_2 \cdot a^{\frac{t_2 - t_1}{10}}, \quad (159)$$

где лишь в отдельных частных случаях получается возможность использовать значения: $a = 2$ или $k = 10^{\circ}\text{C}$.

Встречающиеся в литературе пределы колебаний значения показателя степени n в формуле (151) и коэффициентов a и k в формулах (159) приведены в табл. 5.

Следует иметь в виду, что в ряде случаев эти колебания связаны с тем, что при постоянном напряжении в принципе могут иметь место два разных вида процесса старения: электрохимическое и ионизационное, хотя последнее ранее считалось характерным процессом старения только при переменном напряжении.

Если конденсаторы испытываются при воздействии постоянного напряжения, значительно превышающего нормальное рабочее, то можно опасаться, что от электрохимического процесса, происходящего при рабочем напряжении, мы перейдем к ионизационному процессу и получим соответственно значительное изменение коэффициентов, характеризующих скорость явления ста-

Значения коэффициентов, характеризующих процесс старения различных типов конденсаторов при постоянном напряжении

Тип конденсатора	n	$\frac{a}{h} = 10$	$\frac{h}{a} = 2$	Примечания
Бумажный	5	2	10	Средние данные Обычный разброс Крайние пределы разброса
То же	4—6	2—2,5	10—13	
» »	3,7—20	1,5—6	8,7—26	
Пленочный (полиэтилен- терефталат)	4—6,5	2—4	5—10	100—200% U_H , 75°С
Слюдяной	8	2	10	100—200% U_H , 125°С
Стеклопленочный	5	4—6	20	100—400% U_H , 125°С
Керамический низкоча- стотный	3	2	10	150% U_H , 150°С
Керамический с погра- ничным слоем	2,3	2	10	100—500% U_H , 70°С
Электролитический тан- таловый фольговый . .	5	1,4—2,3	5—12	80—100% U_H , 85°С

рения. Применение при изучении старения испытательного напряжения, значительно превышающего номинальное, при одновременном воздействии температуры, превышающей верхний предел рабочего диапазона, опасно также и потому, что конденсаторы могут попасть в режим теплового пробоя и тогда их «срок жизни» окажется резко сокращенным.

§ 37. Длительная электрическая прочность

Мы установили выше, что для большинства диэлектриков, применяемых в конденсаторостроении (за исключением газов), имеет место процесс старения, характеризуемый постепенным снижением электрической прочности конденсатора с течением времени (рис. 100). В связи с этим мы должны рассматривать кратковременную электрическую прочность $E_{кр}$, по величине которой можно судить, какие кратковременные перенапряжения может выдержать конденсатор и какую напряженность поля $E_{ис}$ можно допускать для него при кратковременных испытаниях, а также рассматривать и длительную электрическую прочность $E_{дл}$, по которой надо выбирать значение $E_{раб}$ — рабочей напряженности поля, допускаемой в диэлектрике конденсатора при его длительной работе под напряжением.

Если определение кратковременной прочности обычно не представляет особых затруднений, то установление длительной прочности, особенно если требуется большой срок службы конденсатора, очевидно, может представить значительные трудности. Для надежного выбора величины $E_{раб}$, при которой основная часть изготовленных конденсаторов обеспечит бесперебойную

работу в течение гарантируемого срока службы, желательно иметь значение $E_{дл}$, соответствующее этому сроку службы. В этом случае, взяв определенный коэффициент запаса для того, чтобы учесть возможный разброс значений $E_{дл}$, можно обоснованно установить допускаемое значение $E_{раб}$. В § 32 была приведена табличка, в которой указывался порядок сроков службы, который требуется от современных конденсаторов в некоторых типичных областях их применения.

В том случае, когда заданный срок службы исчисляется тысячами часов, непосредственное определение $E_{дл}$ еще возможно, хотя и требует проведения испытаний с продолжительностью порядка 1 года. В тех случаях, когда срок службы должен составлять величину, исчисляемую одной-двумя сотнями тысяч часов (10—20 лет), вопрос о возможности непосредственного нахождения $E_{дл}$ из опыта делается нереальным. В этом случае уже приходится или ориентироваться на данные, полученные из опыта эксплуатации конденсаторов, для чего надо иметь хорошо налаженную связь с потребителями, или прибегать к каким-либо косвенным методам оценки величины $E_{дл}$.

Рассмотрим сначала вопрос об электрической прочности при длительном воздействии постоянного напряжения. В этом случае мы будем иметь дело в основном с конденсаторами для электронной аппаратуры, для которых требуемый срок службы при непрерывной работе обычно не превышает нескольких тысяч часов. Во многих случаях для таких конденсаторов длительная электрическая прочность находится непосредственно из опыта путем определения «кривых жизни» $E_{пр} = f(\tau)$ для длительных периодов времени воздействия напряжения на испытываемые конденсаторы. Опыт ставится следующим образом. Берется партия однотипных конденсаторов, прошедшая обычное испытание «на пробой» для устранения заведомо дефектных экземпляров, и разбивается на ряд групп, не менее чем по 10—20 штук в группе (желательно 50—100 штук). Каждая группа устанавливается под определенное напряжение при заданном значении температуры окружающей среды (обычно максимально допускаемое значение) и ведется наблюдение за временем от момента включения группы до момента пробоя каждого из входящих в нее конденсаторов, т. е. определяется их срок службы при заданном значении напряжения.

Результаты опыта обычно выражаются в виде серии кривых, изображающих зависимость суммарного числа пробитых образцов

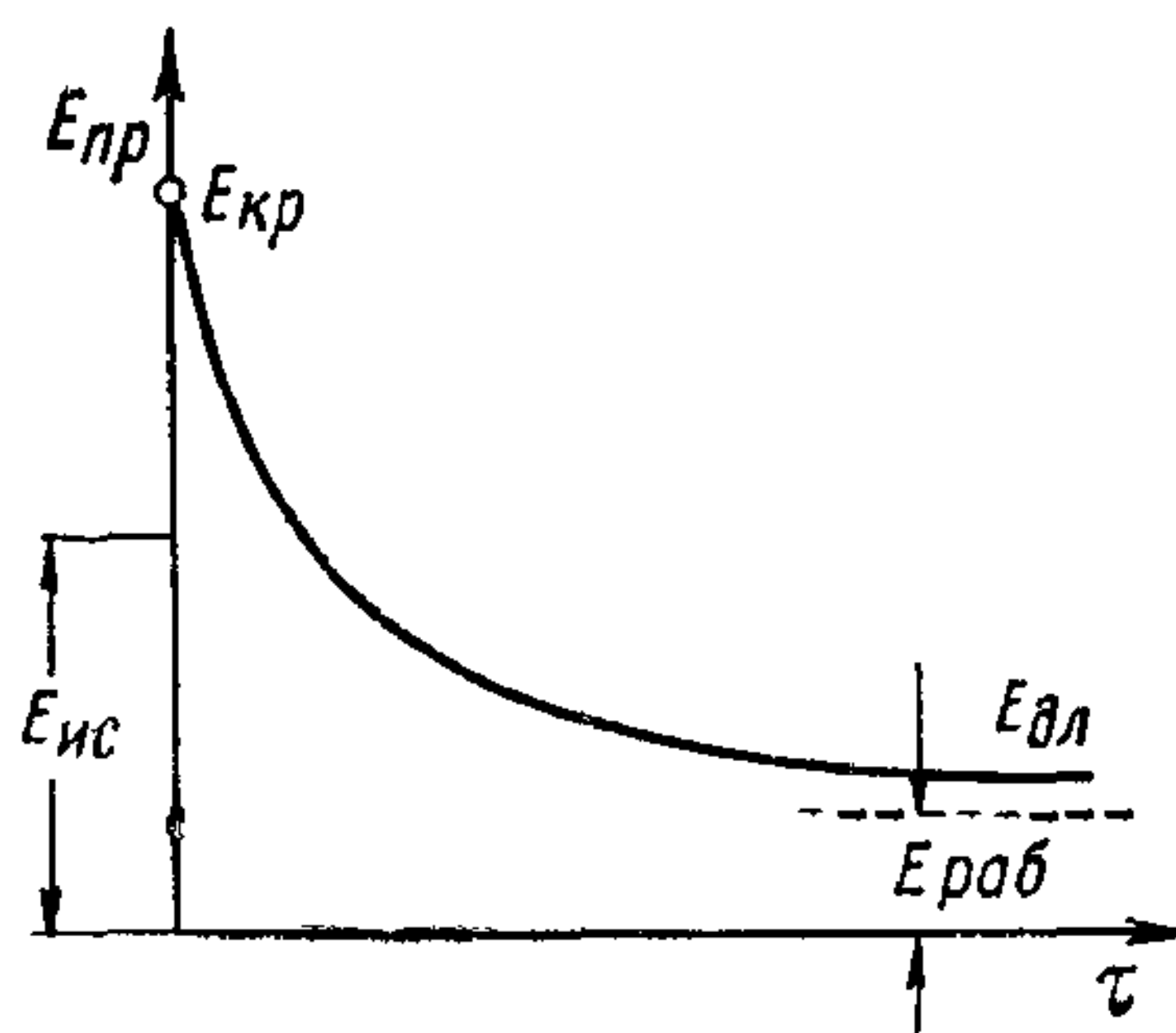


Рис. 100. Снижение электрической прочности диэлектрика конденсатора в процессе старения.

при заданном, или любом меньшем, времени от продолжительности испытания (рис. 101). Величина, откладываемая в данном случае по оси ординат, характеризует нам интегральную вероятность пробоя конденсатора при заданном значении напряжения (или напряженности E) при том или ином сроке работы конденсатора. Какое же время выбрать как характерное из набора времен, полученных при одном и том же напряжении? Проще всего взять среднее значение, но для его нахождения надо дождаться пробоя всех образцов, входящих в группу, а это требует очень большого времени. Поэтому обычно вместо среднего значения $\tau_{\text{ср}}$ берут

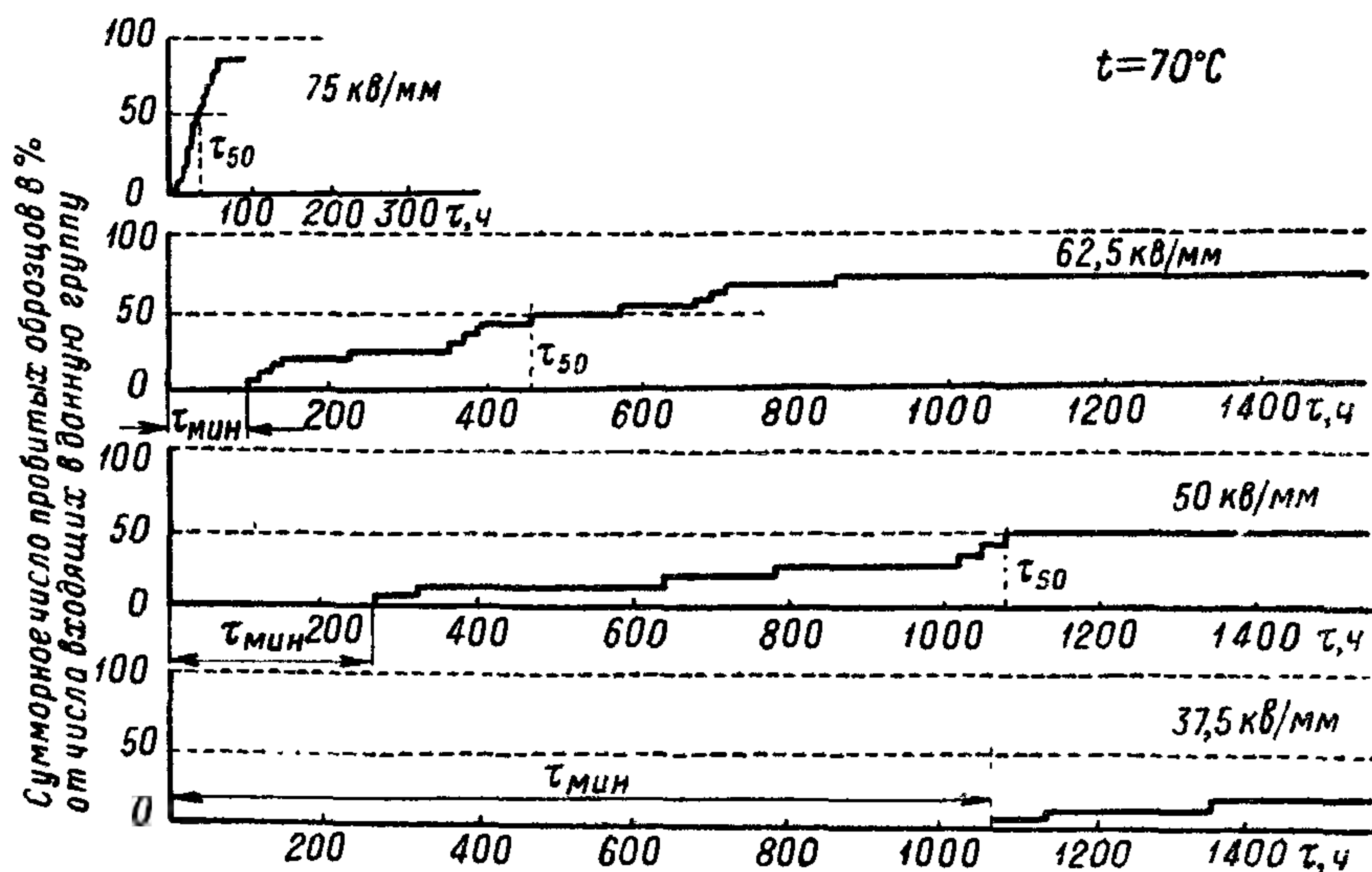


Рис. 101. Зависимость интегральной вероятности пробоя бумажно-вазелиновых конденсаторов от времени старения при температуре 70°C и различных значениях напряженности поля в диэлектрике.

значение времени, соответствующее вероятности 50%, т. е. τ_{50} ; в этом случае опыт сокращается, так как надо дождаться, чтобы пробилось лишь немного более половины образцов, входящих в группу.

Зависимость между E и τ_{50} показана на рис. 102 (по данным опыта, приведенным на рис. 101) в виде кривой 1. В билогарифмическом масштабе получаем прямую линию, соответствующую формуле (151) со значением $n = 6,7$. Выпавшая точка, соответствующая $E = 70 \text{ кВ/мм}$, при которой основная масса конденсаторов пробилась за время менее 100 ч, свидетельствует об изменении природы старения при переходе к столь завышенному значению напряженности, о чем говорилось выше.

Однако среднее значение срока службы конденсаторов или то значение, при котором пробивается 50% конденсаторов, не интересует потребителя. Он хочет знать то значение срока службы, при котором основная часть конденсаторов будет работать, не

пробиваясь. Практически важно знать поэтому не τ_{50} , а $\tau_{мин}$, до которого еще не наблюдается пробоев. Эти значения времени отмечены на рис. 101 и по ним на рис. 102 построена кривая 2. Она также выражается прямой (для нее в данном примере $n = 5$) и также имеет ответвление в левую сторону при наибольшем значении напряженности, использованной в данном опыте, $E = 70$ кв/мм.

Однако определение $\tau_{мин}$ связано с трудностями, так как в начале испытания могут быть случайные пробои заведомо дефектных образцов, которые не были выявлены при кратковременном испытании «на пробой», поскольку такое испытание не дает полной гарантии (§ 32). Ранее выходили из положения так: под величиной $\tau_{мин}$ понимали такой срок службы, при котором должно быть не более определенного числа преждевременных пробоев; например, некоторые фирмы в США оговаривали не более 2% пробоев при времени, меньшем или равном $\tau_{мин}$. При этом число образцов в группе должно быть достаточно большим; так, при 50 образцах пробой одного экземпляра уже составляет 2% от группы. Теперь обычно при установлении срока службы исходят из представления об определенной заданной надежности конденсатора (§ 40).

Следует отметить, что разброс данных для бумажных конденсаторов в табл. 5 отчасти связан и с тем, что в некоторых случаях использовались значения τ_{50} , а в других $\tau_{мин}$.

«Кривым жизни» конденсаторов, подобным показанным на рис. 101 или 102, обычно придается значение характеристики, показывающей снижение электрической прочности со временем. Между тем, как ясно из сказанного выше, опыт по снятию этих кривых ставится так, что мы находим зависимость срока службы τ от напряжения, приложенного к конденсатору, а не определяем его $E_{пр}$ при различном времени воздействия. Более того, оказывается, что если мы попытаемся пробить конденсатор, находящийся на стенде для длительных испытаний и проживший большую часть своей «жизни» при этом режиме (т. е. приближающийся к концу своего срока службы), путем кратковременного повышения приложенного к нему напряжения, то полученное при этом значение $E_{пр}$, как это ни странно на первый взгляд, будет сравнительно мало отличаться от $E_{кр}$ — кратковременной электрической прочности несостаренного конденсатора. Во всяком случае так обстоит дело с бумажными конденсаторами.

По-видимому, в процессе старения идет не простое постепенное снижение $E_{пр}$, как кажется по взгляду на «кривые жизни», а под-

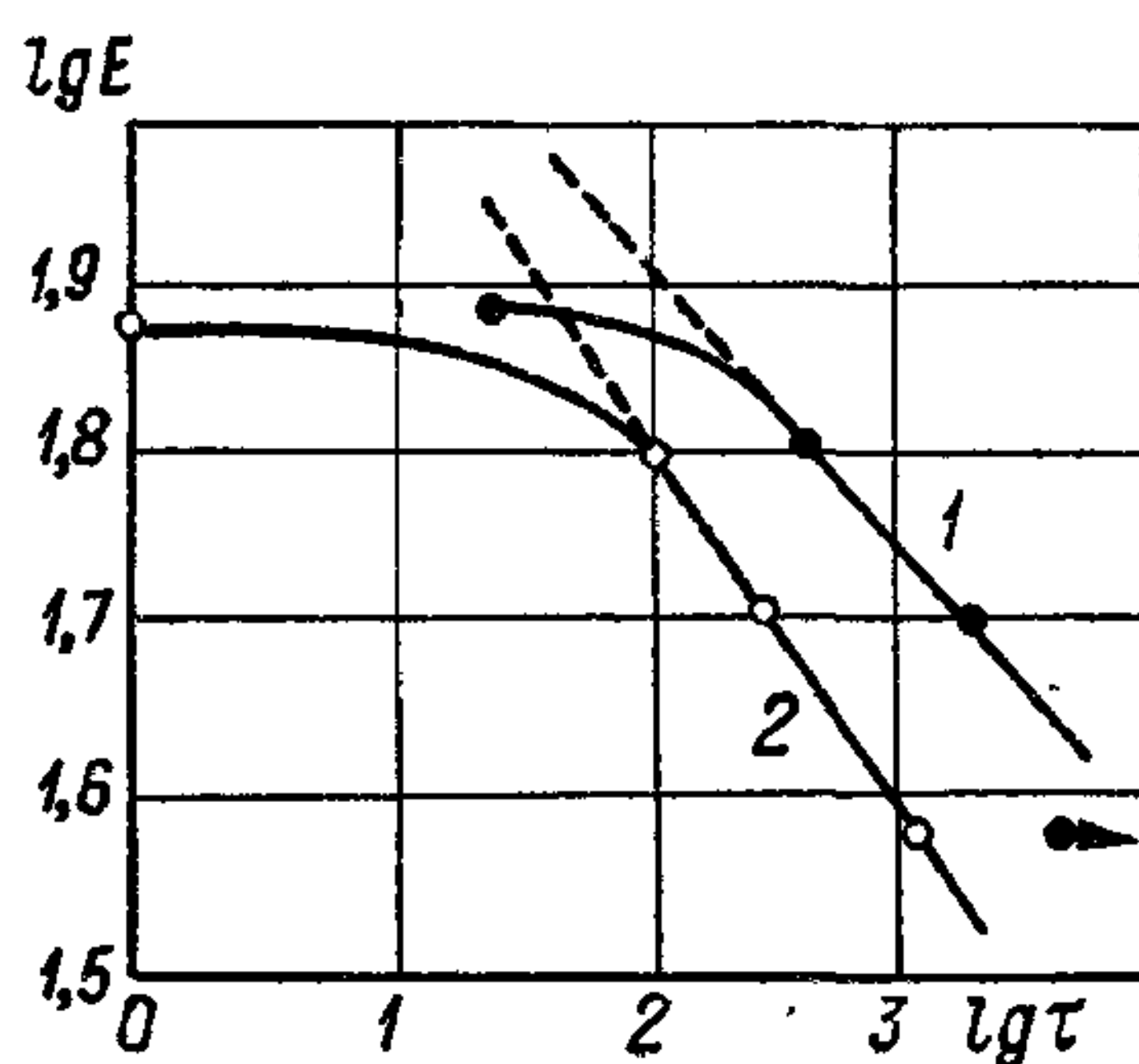


Рис. 102. Зависимость пробивной напряженности от времени старения, построенная по данным рис. 101.

готовка к тому, чтобы на последних стадиях процесса произошли быстрое падение $E_{пр}$ и пробой; иными словами, фактическая зависимость электрической прочности от времени старения при заданном характере «кривой жизни» (рис. 103) должна иметь вид кривой 2. Пунктиром показано быстрое снижение $E_{пр}$ перед пробоем конденсаторов в точках a , b и c при приложенных длительно напряжениях E_a , E_b и E_c и сроках службы τ_a , τ_b и τ_c .

Можно предполагать, что в процессе старения идет постепенное разрушение диэлектрика в отдельных слабых местах, причем только в конце этого процесса происходит быстрое снижение активной толщины диэлектрика в наиболее слабом из разрушенных участков до такого значения, когда при заданном относи-

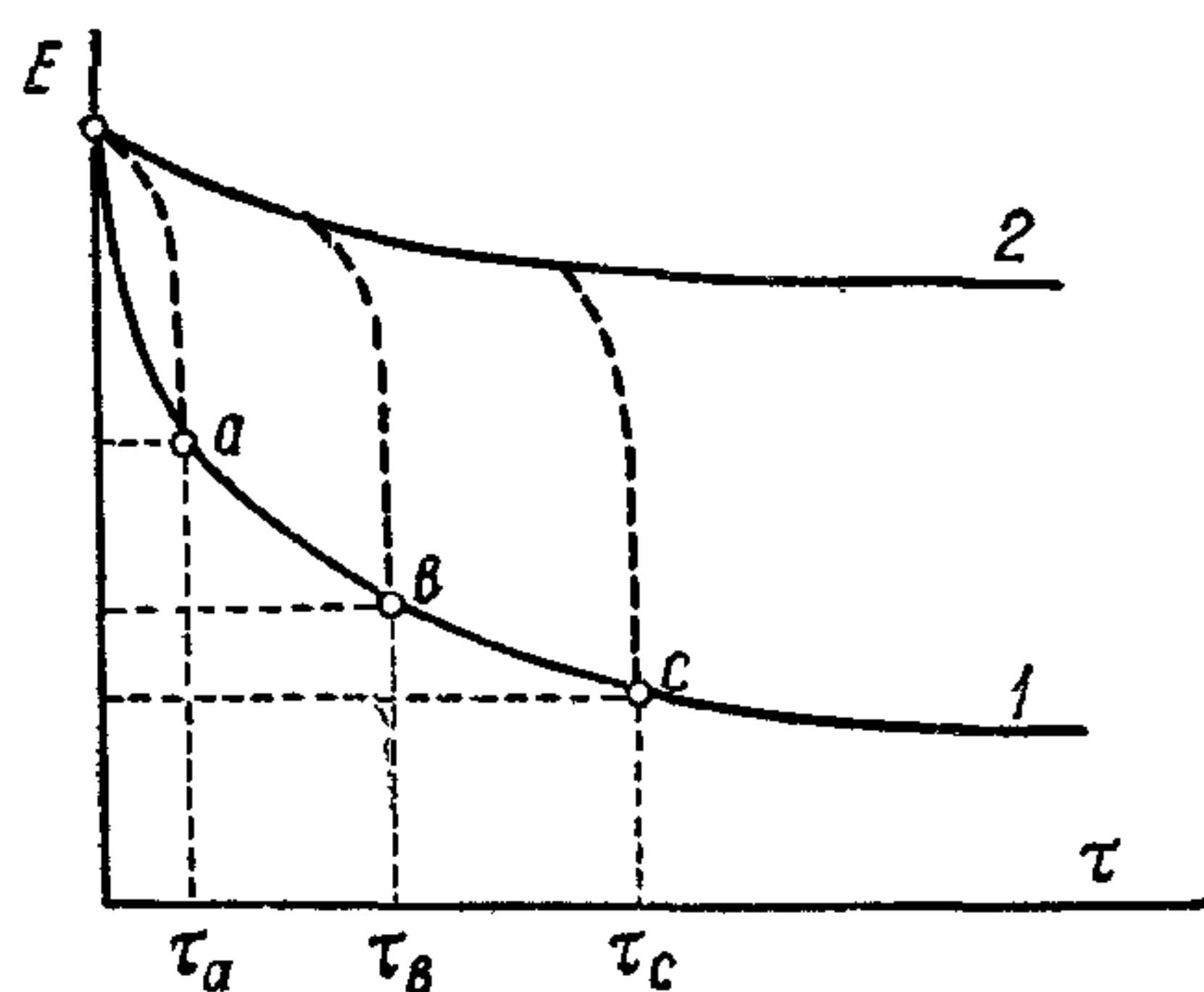


Рис. 103. Изменение электрической прочности бумажного конденсатора в процессе старения.

1 — «кривая жизни»; 2 — фактическая зависимость кратковременной пробивной напряженности от времени старения.

тельно небольшом напряжении величина локальной напряженности за счет снижения активной толщины возрастает до значений, достаточных для пробоя. Это мы воспринимаем как падение $E_{пр}$, поскольку полагаем, что толщина диэлектрика не изменяется. Такую же картину явления установили А. Н. Цикин и С. Н. Койков с сотрудниками при изучении процессов старения под напряжением синтетических пленок. Именно поэтому выше было отмечено, что формула (151) правильнее отражает физическую сторону явлений, чем (155).

Наличие степенной зависимости между приложенным напряжением и сроком службы, выражаемой формулой (151), на первый взгляд дает возможность оценивать длительную электрическую прочность путем ускоренных испытаний, т. е. не доводя «кривую жизни» до времени, соответствующего заданному сроку службы, а заканчивая опыты раньше с последующей экстраполяцией полученных результатов. Однако, с учетом разброса значений коэффициентов, входящих в формулы для оценки старения (см. табл. 5), результаты такой экстраполяции не очень надежны и ими теперь редко пользуются при установлении значений $E_{дл}$ для выбора $E_{раб}$. Правильнее использовать для этой цели прямой опыт с доведением «кривой жизни» до заданного значения срока службы (иногда и дальше, для определения полного ресурса конденсатора), а полученную при этом закономерность старения, с соответственно найденными коэффициентами старения, применить впоследствии для контроля качества разработанного типа конденсатора при его запуске в массовое производство, путем отбора проб от выпускаемых производством массовых партий и их уско-

ренного испытания. Такое проверочное ускоренное испытание записано во многих ТУ на различные типы конденсаторов и предусматривает длительную работу конденсаторов (обычно 250 ч) при напряжении $150\% U_{\text{ном}}$ и при максимальной рабочей температуре конденсатора. Если основываться на законе пятой степени, то ускорение испытания получается в 6,3 раза, т. е. оно эквивалентно испытанию при номинальном напряжении в течение 1580 ч. Если учесть, что в условиях эксплуатации конденсаторы обычно редко непрерывно работают при верхнем пределе рабочей температуры, то можно полагать, что такое ускоренное испытание эквивалентно нескольким тысячам часов нормальной эксплуатации конденсатора. Иногда для дополнительного ускорения испытания прибегают к повышению температуры окружающей среды выше оговоренного значения $t_{\text{макс}}$ для данного типа конденсатора и оценивают полученный выигрыш во времени, используя формулу (156) или, чаще, формулу (159). При форсировании испытания как по напряжению, так и по температуре для сравнения сроков службы при номинальном режиме работы τ_1 и при ускоренном режиме испытания τ_2 используют комбинированную формулу

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^n \cdot 2^{\frac{t_2 - t_1}{k}}, \quad (160)$$

где U_1 и U_2 — соответствующие значения напряжений, а t_1 и t_2 — соответствующие значения температур окружающей среды; значения n и k даны в табл. 5.

Сильное влияние температуры на срок службы конденсаторов при постоянном напряжении за счет развития процессов электрохимического старения ограничивает верхний предел рабочей температуры конденсатора. Однако этот предел можно расширить, если соответственно снизить рабочее напряжение конденсатора, поскольку при этом срок службы увеличится. Это уже давно было учтено рядом зарубежных фирм, применивших так называемый дирейтинг (derating), т. е. регламентированное снижение рабочего напряжения по сравнению с номинальным значением, указанным в маркировке, при соответствующем повышении рабочей температуры по сравнению с тем значением, которое соответствует номинальному напряжению.

Теперь эта идея введена в международные нормы на ряд типов конденсаторов. На рис. 104 показано снижение допускаемого рабочего напряжения по сравнению с номинальным для бумажных конденсаторов, рекомендуемое Международной электротехнической комиссией (МЭК): кривая 1 при всех $U_{\text{ном}}$ для запаса энергии менее 5 дж и для $U_{\text{ном}}$ выше 2500 в при 5—50 дж, кривая 2 — при $U_{\text{ном}} < 1500$ в для запаса энергии более 50 дж. Кривой 2 соответствуют конденсаторы с увеличенными размерами корпусов (большая энергия при пониженном напряжении требует большой

емкости, т. е. увеличенного объема), у которых ухудшен теплоотвод от внутренних частей конденсатора, а потому более опасен тепловой пробой; для таких конденсаторов предусмотрено большее снижение допускаемого напряжения с температурой. Для некоторых типов конденсаторов снижение рабочего напряжения при повышении температуры теперь предусматривается и советскими нормами. Это касается не только конденсаторов с органическим диэлектриком, но и ряда типов конденсаторов с неорганическим диэлектриком, например, керамических (рис. 105).

В отличие от работы при постоянном напряжении, когда вследствие электрохимического характера старения при бесконечно

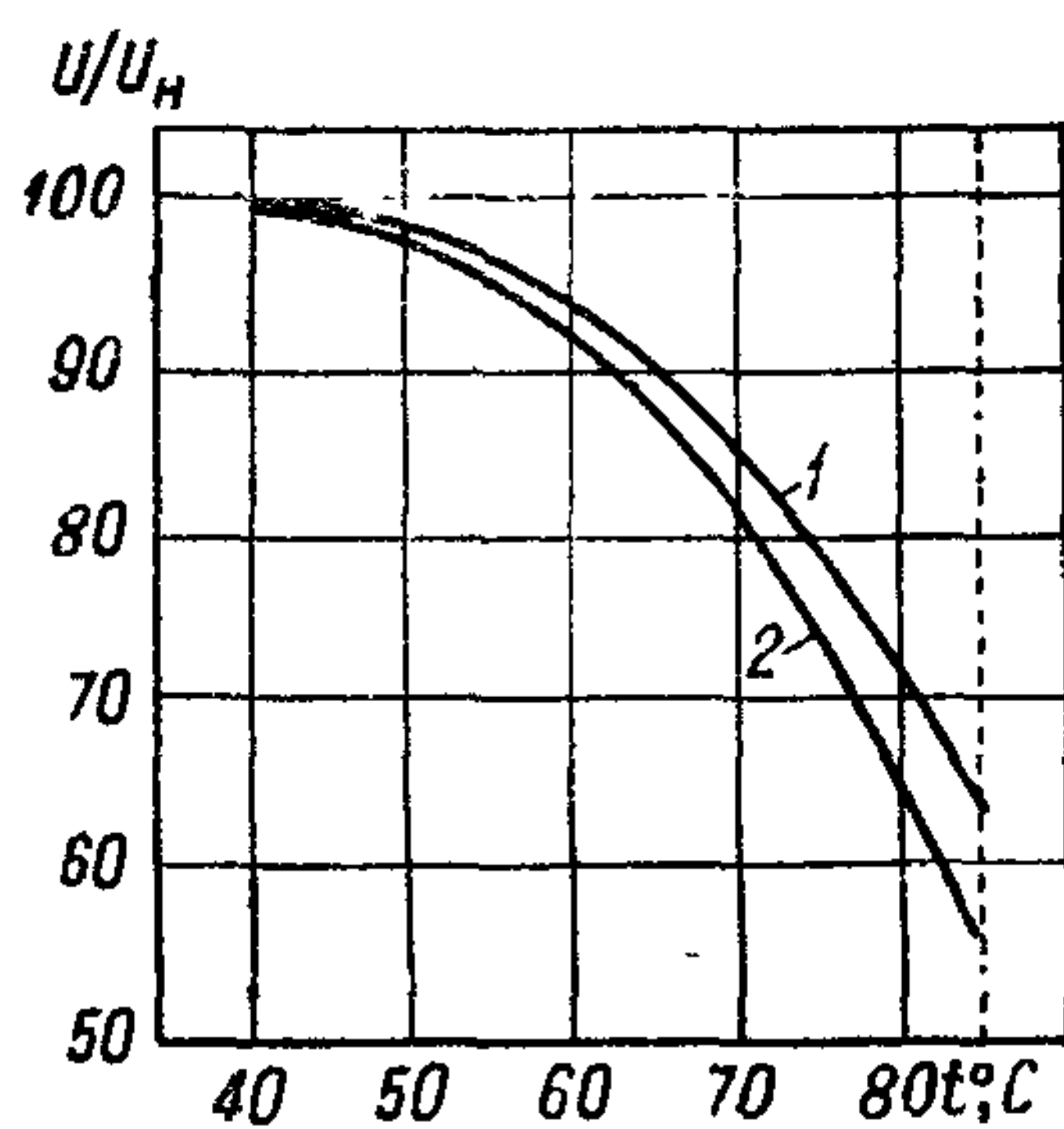


Рис. 104. Снижение допускаемого рабочего напряжения бумажных конденсаторов в сравнении с номинальным при повышении рабочей температуры по рекомендации МЭК (пояснения к кривым — в тексте).

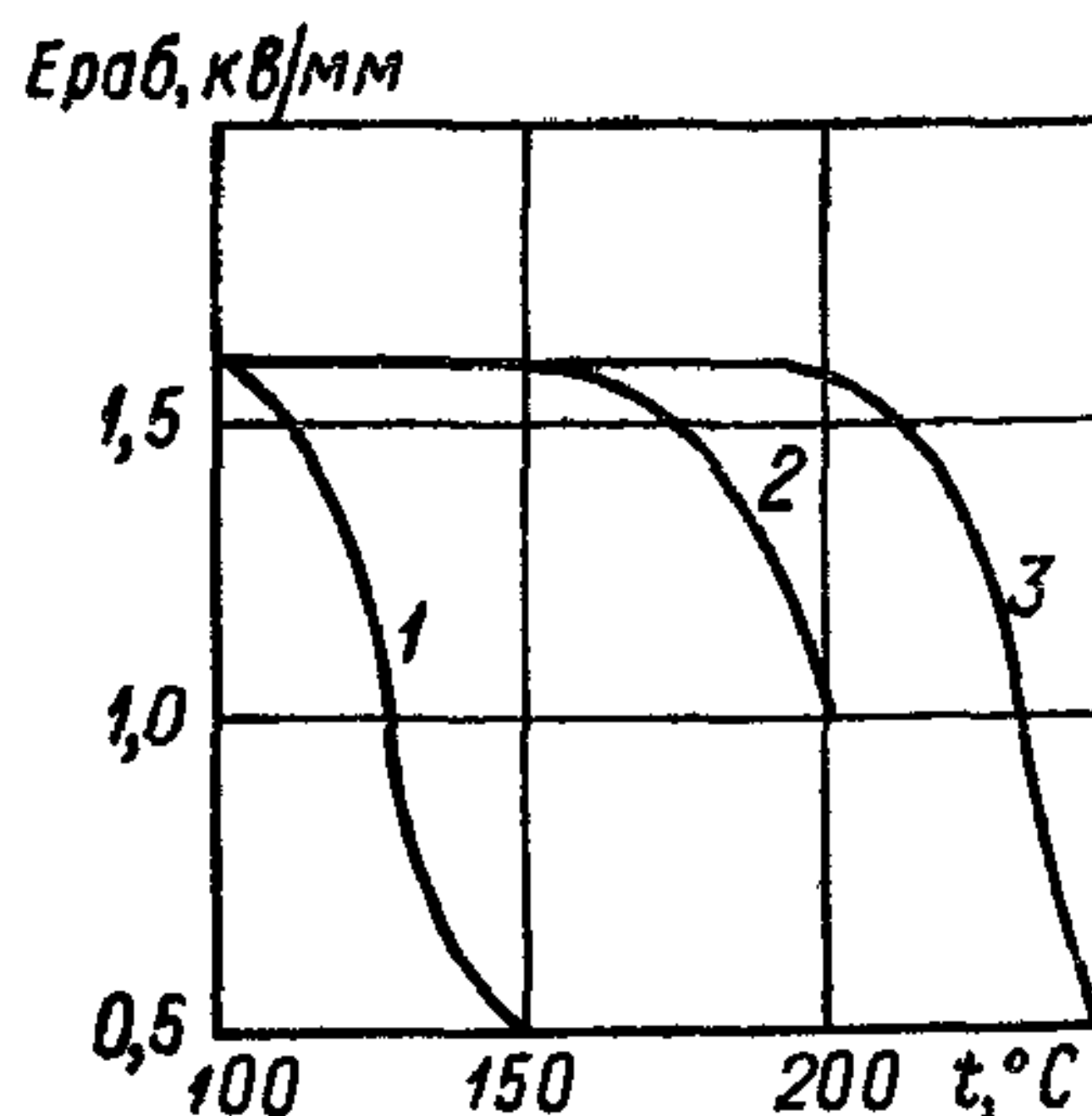


Рис. 105. Зависимость допускаемой рабочей напряженности в диэлектрике конденсаторов типа ТКЕ и КДК от температуры.

1 — титановая керамика (Т80);
2 — титаноцирконатная керамика (Т40); 3 — безтитановая керамика.

большом сроке службы можно представить себе стремление пробивного напряжения к нулю, работа конденсатора при переменном напряжении, когда старение носит преимущественно ионизационный характер, должна характеризоваться снижением пробивного напряжения до некоторого конечного значения $E_{и}$ при больших значениях времени. Эта величина, очевидно, и характеризует длительную прочность $E_{дл}$; поэтому выбор рабочей напряженности должен, по-видимому, проводиться из расчета, что $E_{раб} < E_{и}$. При этом ионизация в диэлектрике должна отсутствовать, не должно иметь место и старение, а следовательно, срок службы конденсатора теоретически должен быть бесконечно большим.

В случае непропитанных конденсаторов или пропитки их отвердевающими массами, когда в диэлектрике конденсатора

содержится много воздуха и величину $E_{и}$ можно четко определить по перегибу кривой $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ (рис. 61, выше), выбор значения $E_{раб}$ не представляет особых затруднений. В случае пропитки жидким диэлектриком, особенно маслом, вопрос сильно осложняется. Выше было указано, что при использовании высокочувствительных устройств для обнаружения ионизационных разрядов первые следы ионизации можно найти при относительно небольших значениях напряженности поля, сравнительно немного превышающих те значения, которые получаются для непропитанной изоляции (рис. 88, выше).

Возникает вопрос, действительно ли необходимо в этом случае выбирать $E_{раб} < E_{и}$? Как будет показано в гл. IX, объем конденсатора обратно пропорционален величине $E_{раб}^2$, а потому при заниженных значениях этой характеристики размеры и стоимость конденсатора могут так вырасти, что применение его сделается неэкономичным.

В то же время можно думать, что слабые начальные следы ионизации неопасны для диэлектрика или же, если и вызывают его старение, то настолько медленное, что срок службы конденсатора будет вполне достаточным для целей практики. На этот вопрос можно ответить только на основе длительных испытаний, т. е. опять-таки отпадает возможность заменить изучение «кривых жизни» при переменном напряжении косвенным и быстрым методом нахождения $E_{и}$, позволяющей оценить $E_{дл}$ и выбрать $E_{раб}$. В данном случае изучение «кривых жизни» осложняется не только тем, что для силовых конденсаторов — основного типа конденсаторов, применяемых при частоте 50 гц, срок службы должен составлять 10—20 лет, но и тем, что форсирование испытания повышением напряжения по сравнению с номинальным при переменном напряжении связано с ростом активной мощности [формула (106), выше] и повышением температуры конденсатора. Тем не менее, в последние годы начаты работы по изучению поведения силовых конденсаторов (иногда на специальных макетах с искусственным охлаждением) при длительном воздействии переменного напряжения и, в ряде случаев, с параллельным определением интенсивности ионизации в условиях испытания с помощью высокочувствительных установок. В результате длительных исследований была показана возможность при замене масла хлорированными дифенилами, более устойчивыми к действию ионизации, заместно повысить длительно допускаемые значения $E_{раб}$ и получить снижение объема силовых конденсаторов в 3—4 раза по сравнению с теми значениями, которые ранее были характерны для бумажномасляных силовых конденсаторов. Для определения зависимости срока службы силовых конденсаторов, пропитанных хлордифенилом, от напряжения и от температуры предложена эмпирическая формула (§ 35), позволяющая пытаться проводить их ускоренные испытания на «срок жизни» при переменном напряжении.

§ 38. Электрическая прочность конденсаторов при воздействии импульсного напряжения

В современной технике конденсаторы часто применяются в различных импульсных устройствах, использующих энергию, накапливаемую при зарядке конденсатора от источника выпрямленного напряжения и выделяемую в процессе аperiodического или периодического разряда (рис. 106). Этот случай применения конденсаторов заметно отличается от их использования при постоянном или переменном синусоидальном напряжениях, а потому эти конденсаторы рассматривают теперь как особый тип и м п у л ь с -

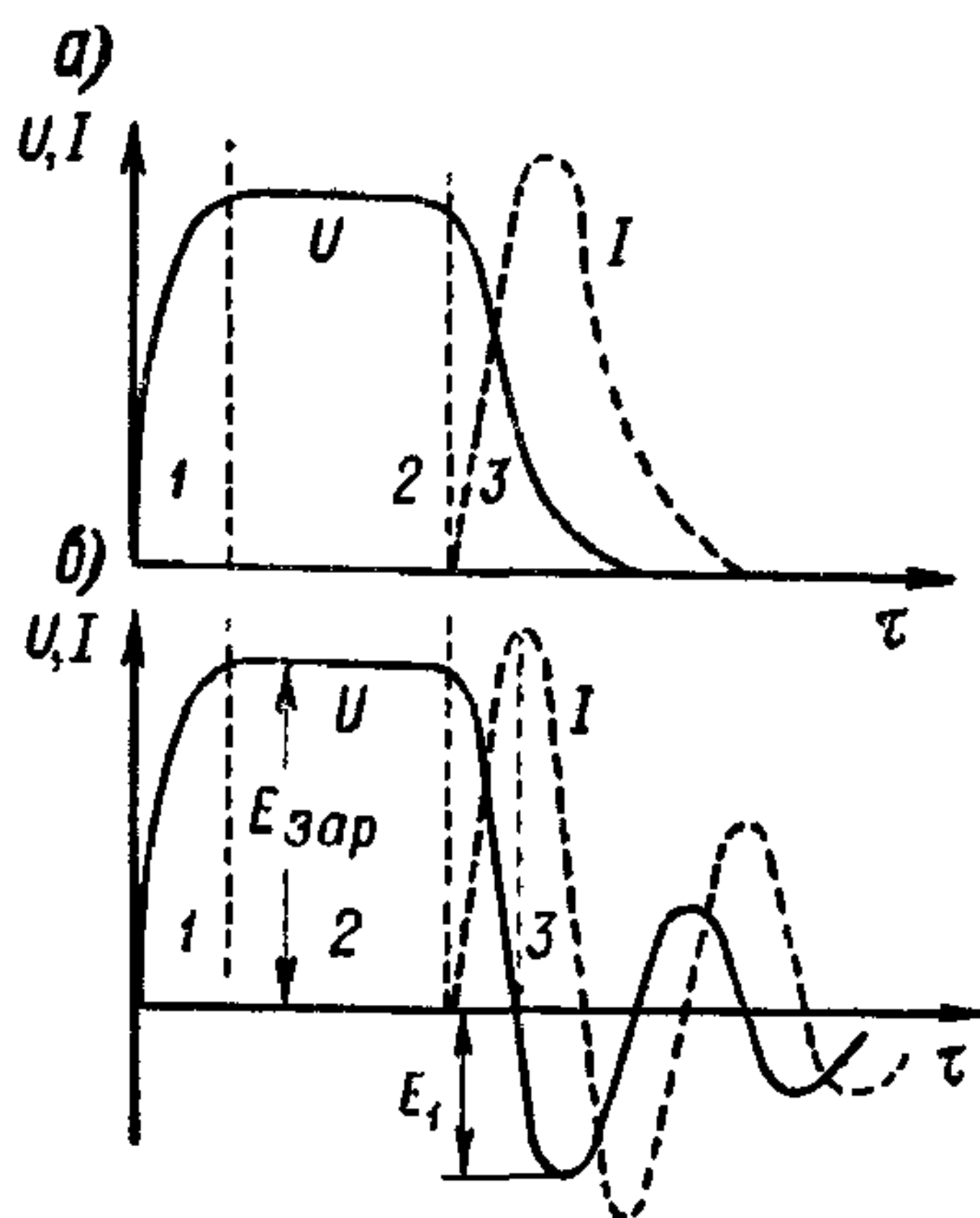


Рис. 106. Изменение напряжения и тока в импульсном конденсаторе: *а* — аperiodический разряд; *б* — периодический разряд (пояснения в тексте).

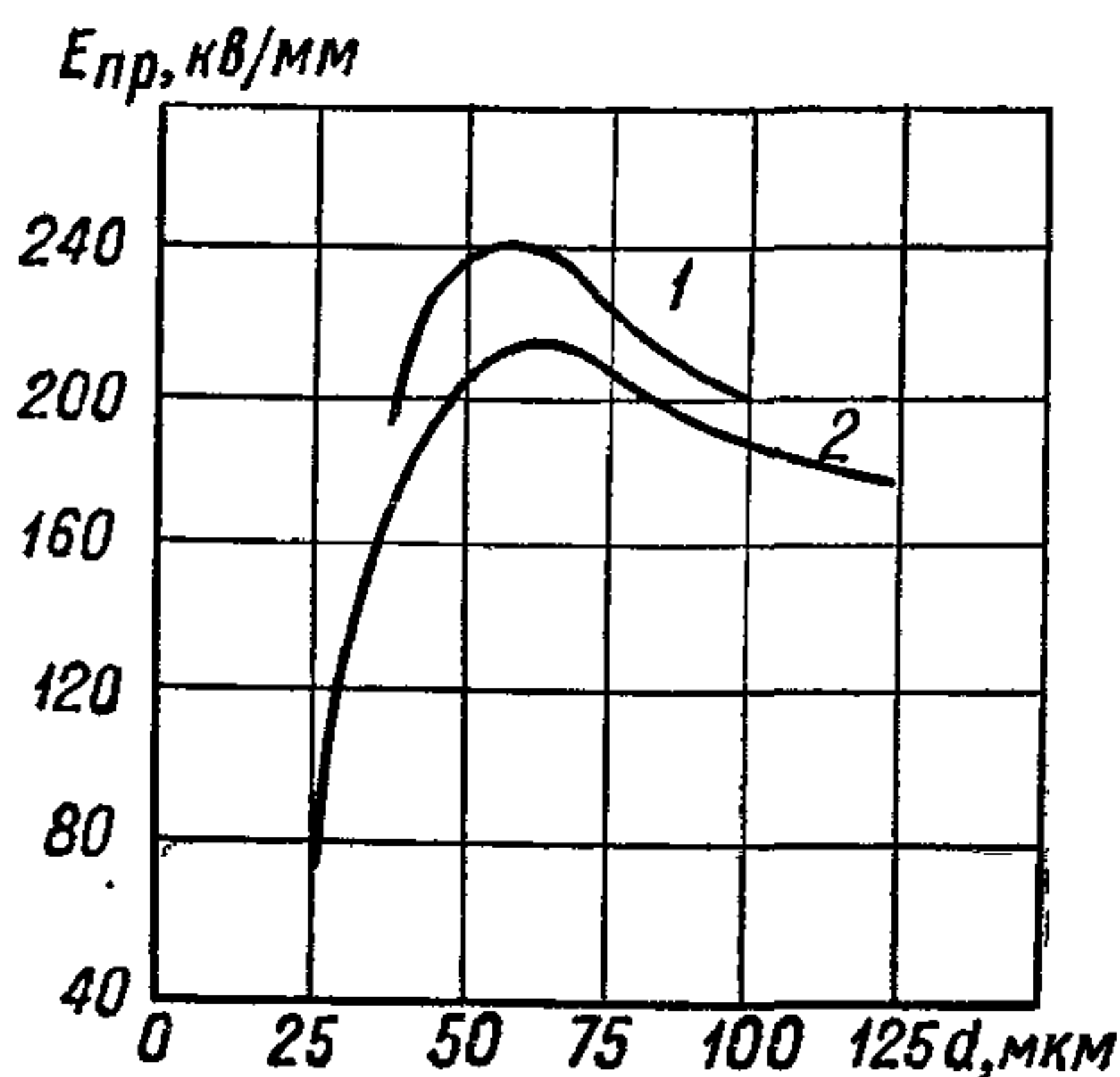


Рис. 107. Зависимость кратковременной электрической прочности бумажных конденсаторов от толщины диэлектрика.

1 — импульсное напряжение; *2* — постоянное напряжение.

ных конденсаторов. Различные случаи применения конденсаторов для создания мощных импульсов были перечислены в § 4.

На кривых рис. 106 можно наметить следующие основные участки при рассмотрении электрической прочности импульсного конденсатора: *1* — период зарядки, *2* — период выдержки при постоянном напряжении и *3* — период разрядки. При относительно крутом подъеме кривой зарядки конденсатор будет находиться в несколько худших условиях, чем при постоянном напряжении, но лишь в конце этого периода, когда напряжение приближается к максимальному значению. Поэтому при пробое на фронте зарядной части импульса, т. е. в период *1*, значения кратковременной прочности мало отличаются от пробивной напряженности, полученной при кратковременном испытании постоянным напряжением (рис. 107), и при не очень крутом фронте импульсная прочность даже несколько выше, чем при постоянном напряже-

нии. В течение периода 2 не должно быть отличия от пробоя при постоянном напряжении. В течение периода 3 диэлектрик конденсатора оказывается под действием напряжения, которое меняется с большой скоростью dU/dt как при апериодическом, так и при периодическом режиме разряда. Эта скорость обычно больше скорости изменения напряжения при частоте 50 гц, поэтому можно считать, что в режиме разряда конденсатор работает при повышенной частоте, когда облегчаются условия возникновения ионизации.

Учитывая, что импульсные конденсаторы рассчитаны на повышенные значения $E_{\text{раб}}$, следует ожидать, что в условиях разряда $E_{\text{раб}}$ будет выше $E_{\text{и}}$ и кратковременная ионизация — неизбежна. Действительно, при неоднократных циклах «заряд — разряд

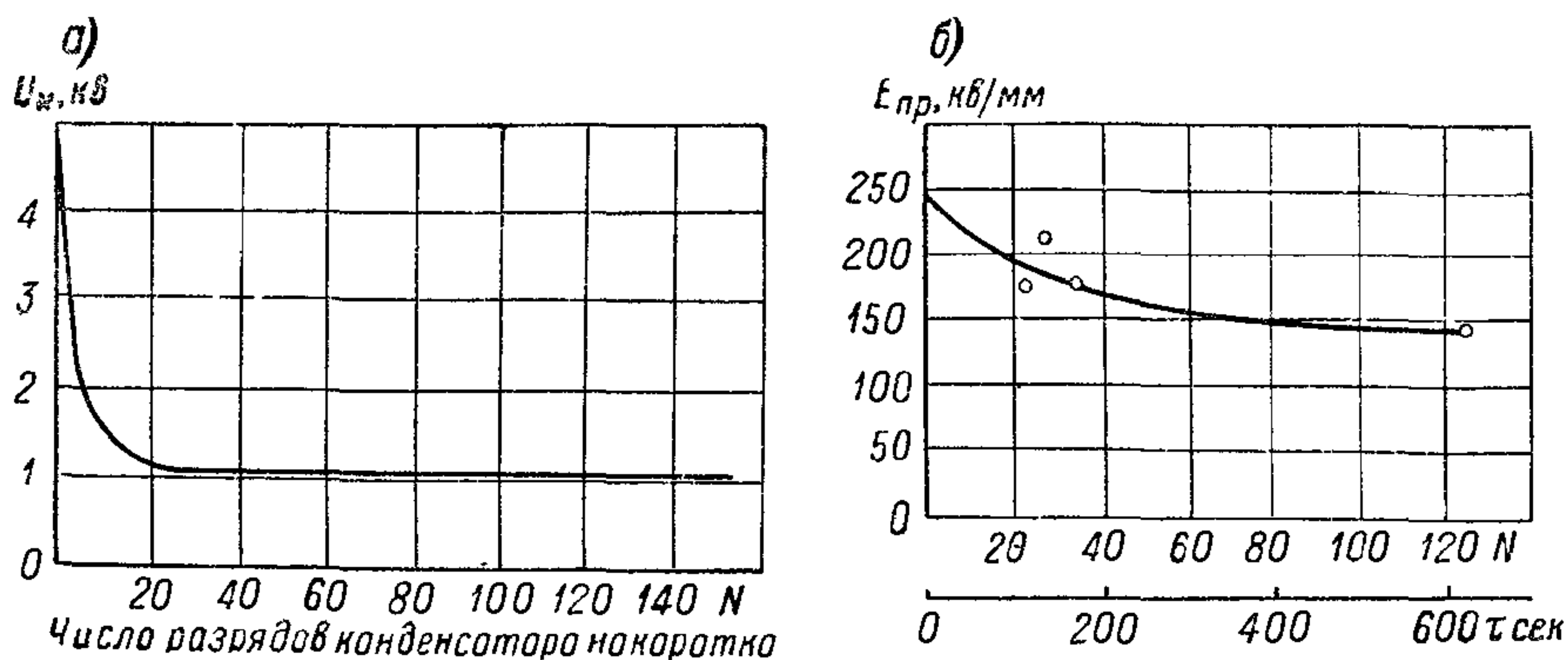


Рис. 108. Зависимость ионизирующего напряжения (а) и пробивной напряженности (б) бумажномасляного импульсного конденсатора от числа импульсов (циклов заряд — разряд).

накоротко» для импульсного конденсатора можно наблюдать снижение $E_{\text{и}}$ с увеличением числа разрядов (рис. 108, а), как и при воздействии ряда перенапряжений в условиях работы при частоте 50 гц (рис. 89, выше). После прекращения разрядов конденсатора, т. е. в «период отдыха» газовая полость, образовавшаяся у края обкладки в процессе ионизации, постепенно рассасывается и напряжение $U_{\text{и}}$ восстанавливает начальное значение.

Однако под действием разрядов происходит и постепенное необратимое разрушение изоляции, причем процесс разрушения носит кумулятивный характер, и после определенного числа импульсов (или циклов заряд — разряд), которое характеризует в данном случае «срок жизни» конденсатора, наступает пробой (рис. 108, б).

Максимальное число импульсов, которое конденсатор может выдержать до пробоя при колебательном разряде, зависит, в первую очередь, от выбранной для диэлектрика напряженности поля $E_{\text{раб}}$, от величины выброса напряжения в обратном направлении и от частоты колебаний при разряде. Иногда величину напряжен-

ности поля характеризуют суммой зарядного значения и амплитуды первого колебания в обратном направлении:

$$E_{\Sigma} = E_{\text{зар}} \left(1 + \frac{E_1 \cdot \%}{100} \right). \quad (161)$$

Влияние частоты разряда на зависимость между этим значением E_{Σ} и «сроком жизни», характеризуемым максимальным числом импульсов, показано на рис. 109. Величину E_{Σ} в зарубежной литературе называют: «Peak to peak voltage».

При больших интервалах между циклами заряд — разряд и при аperiодическом характере разряда обычно гарантируется

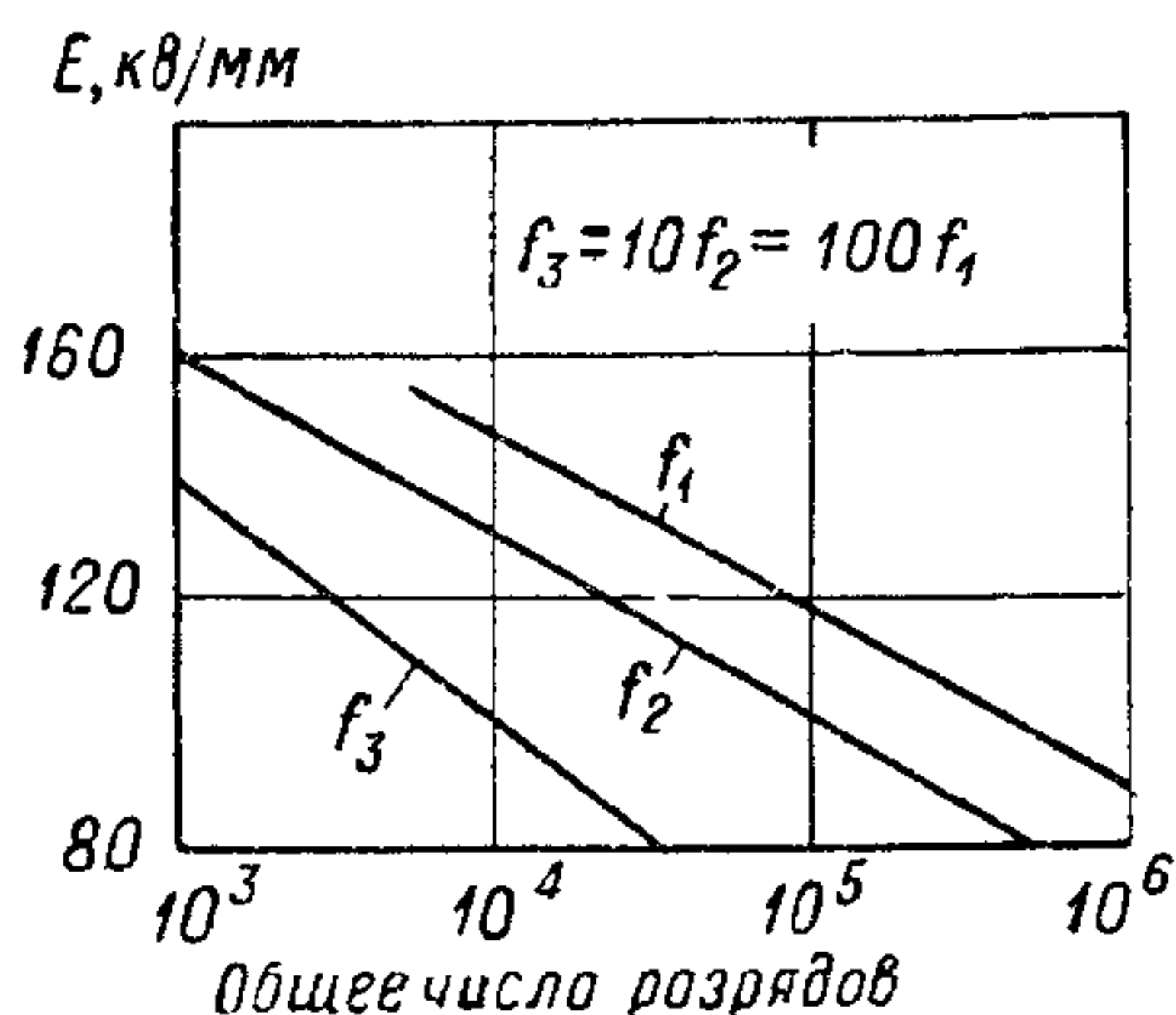


Рис. 109. Зависимость между напряженностью, определяемой суммой зарядного напряжения и первой амплитуды разрядного колебания, и сроком службы импульсного конденсатора при различных частотах колебаний.

срок службы для импульсных конденсаторов не менее 10^4 импульсов (циклов заряда — разряда) при значении $E_{\text{раб}} = 45 \div 60$ кВ/мм (при постоянном напряжении обычные значения до 30—40 кВ/мм). При сокращении срока службы до 1000 циклов заряда — разряда $E_{\text{раб}}$ повышают до 70—100 кВ/мм, что дает возможность заметно снизить размеры конденсаторов. Эти данные соответствуют бумажно-масляным конденсаторам, изготовленным из конденсаторной бумаги. Для конденсаторов из более толстой кабельной бумаги при колебательном разряде с частотой 0,02—1 Мгц и частотой посылок от 1 гц до одного импульса за несколько ми-

нут указывается значение $E_{\text{раб}} = 40$ кВ/мм. В этих случаях учитывают только ионизационную форму пробоя.

В режиме радиолокационных импульсов, когда частота повторения может быть достаточно большой (сотни и тысячи герц), значения $E_{\text{раб}}$ приходится часто снижать до уровня применяемой при переменном напряжении технической частоты (12—13 кВ/мм) и даже ниже. При таком применении конденсатора приходится учитывать также и возможность теплового пробоя. Все указанные здесь значения $E_{\text{раб}}$ соответствуют диэлектрику из бумаги, пропитанной маслом. При замене масла хлорированными жидкостями, а также при использовании комбинированной бумажно-пленочной изоляции эти величины могут быть пересмотрены в сторону их ужесточения.

Так же как и для конденсаторов, работающих при переменном напряжении, для импульсных бумажно-масляных конденсаторов Г. С. Кучинским с сотрудниками была проведена попытка обосновать выбор значений $E_{\text{раб}}$ на основе расчета условий равновесия между газовыделением, вызванным развитием ионизации, и погло-

щением выделяющихся газов в масле. Опытное изучение газовыделения показало, что оно зависит от напряженности поля и резко возрастает при достижении некоторой критической величины E ; было также установлено, что газовыделение заметно зависит от декремента затухания колебаний при периодическом характере разряда.

Как показано З. Щепаньским, это можно объяснить наличием закономерной зависимости напряжения начала установившейся ионизации в диэлектрике бумажномасляного конденсатора от декремента затухания Δ :

$$E_{\Delta} = \frac{E_{и}}{1 + \frac{1}{\sqrt{\Delta}}}, \quad (162)$$

где E_{Δ} — напряженность начала ионизации при колебательном разряде с декрементом затухания Δ ; $E_{и}$ — напряжение начала ионизации при аperiodическом разряде.

§ 39. Пробой по закраине

Пробой конденсатора может произойти не только через толщу диэлектрика, но и по поверхности закраин (перекрытие); поэтому надо рассмотреть вопрос и о п о в е р х н о с т н о м п р о б о е д и э л е к т р и к о в.

Если средой, окружающей диэлектрик, является сухой воздух и приняты меры к выравниванию поля у краев обкладок путем соответствующего утолщения диэлектрика, то н а п р я ж е н и е п е р е к р ы т и я (разрядное напряжение) $U_{пер}$ будет близко к пробивному напряжению воздуха при зазоре соответствующей величины. Если относительная влажность воздуха будет выше 50% и диэлектрик смачивается водой, то на его поверхности образуется пленка воды, снижающая $U_{пер}$. Покрытие разрядной поверхности изоляционным влагоустойчивым лаком ослабляет эту зависимость (рис. 110).

Возможность выравнивания поля мы имеем в случае керамических конденсаторов (рис. 78, выше); чаще приходится иметь дело с диэлектриком в форме плоских пластин (или лент) и гладких трубок, когда электрическое поле у краев обкладок оказывается резко искаженным и мы имеем дело с двумя составляющими напряженности поля: E_t — т а н г е н ц и а л ь н о й, направленной

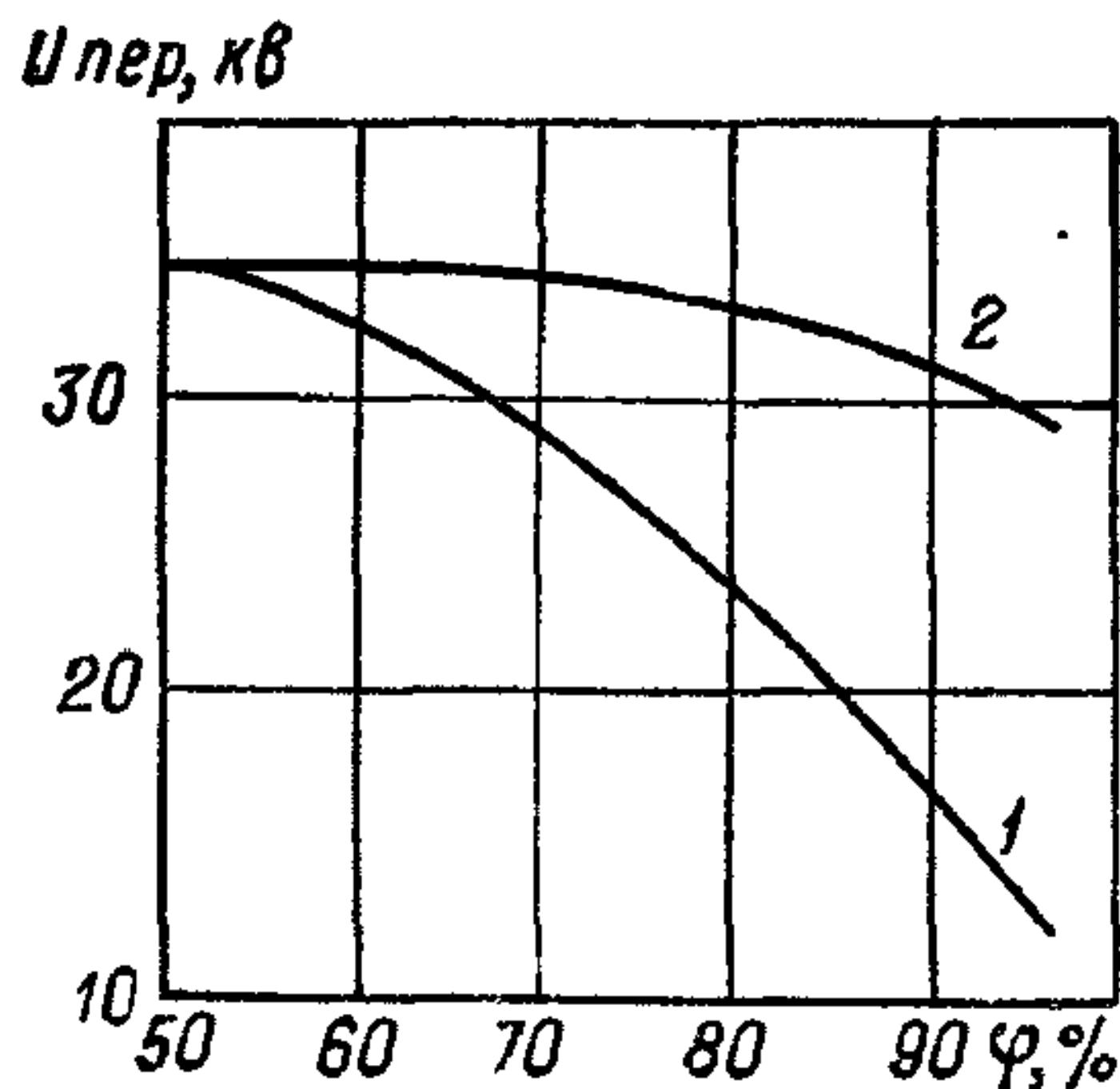


Рис. 110. Зависимость напряжения перекрытия от относительной влажности воздуха для образцов керамики: незащищенного (1) и покрытого влагозащитным лаком (2).

вдоль поверхности закраины, и E_n — нормальной, направленной перпендикулярно этой поверхности.

В этом случае, в отличие от поверхностного пробоя в однородном поле, при некотором напряжении $U_k < U_{\text{пер}}$ у края обкладки начнется ионизация воздуха (к о р о н а; тлеющий разряд), которую можно заметить в темноте по появлению свечения у краев обкладок, а также по возрастанию теперь в конденсаторе при переходе за это значение напряжения. Увеличение напряжения

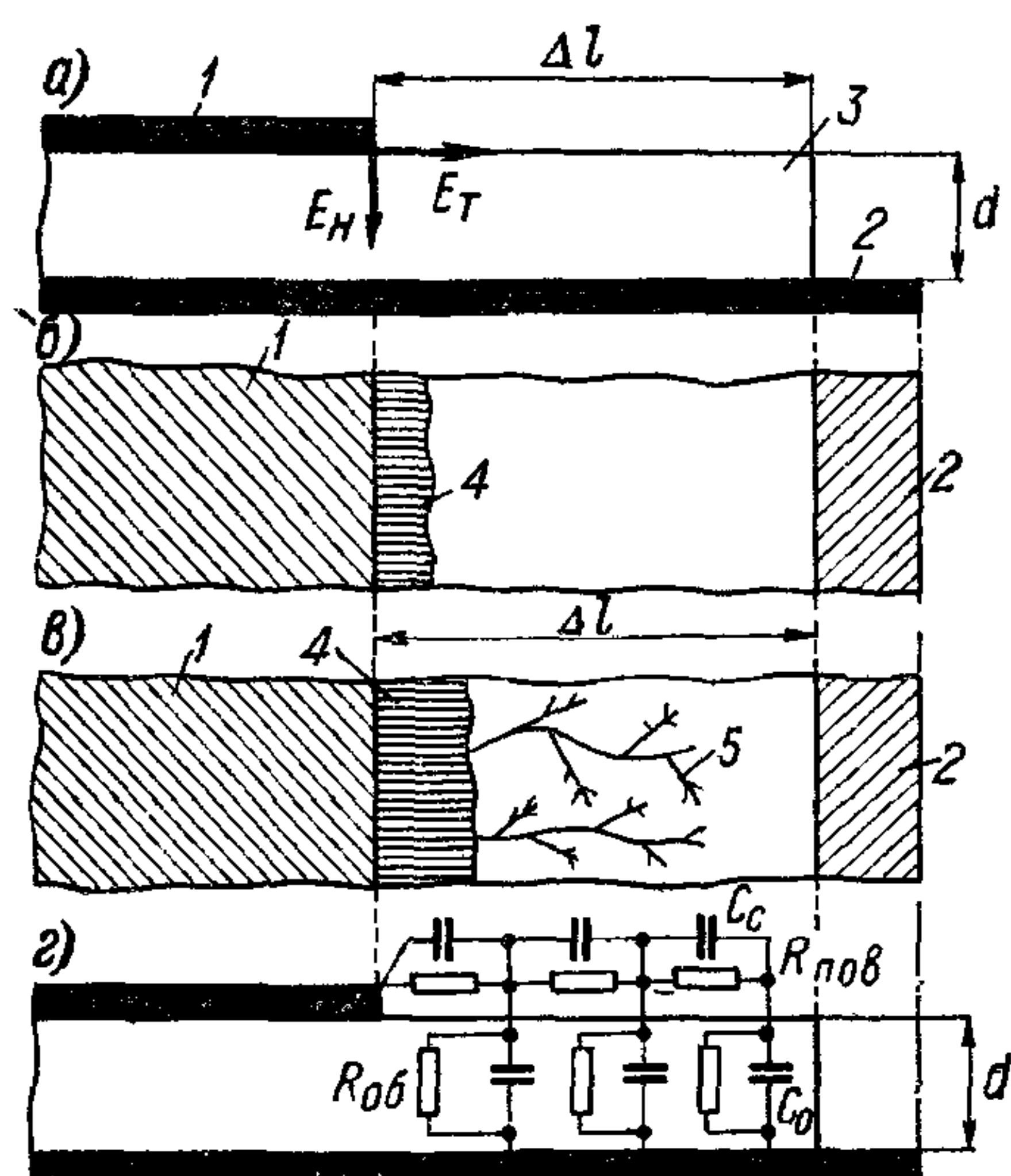


Рис. 111. Схема к рассмотрению пробоя по закраине: а — напряженность поля у края обкладки; б — появление короны; в — появление скользящих разрядов; г — эквивалентная схема.

1 — верхняя обкладка; 2 — нижняя обкладка; 3 — диэлектрик; 4 — область короны; 5 — область скользящих разрядов.

обеих сторон выточены углубления диаметром 20 мм и обкладки нанесены как на дне углублений, так и на их боковой поверхности (т. е. диск превращен в «бочонок», рис. 114, ниже, случай $\theta = 180^\circ$).

При выровненном поле перекрытие происходило без предварительного появления короны, причем величина $U_{\text{пер}}$ мало снизилась при переходе от частоты 50 гц к 1 Мгц; при резко неоднородном поле перекрытию предшествовала корона; повышение частоты резко снизило напряжение перекрытия и сблизило значения $U_{\text{пер}}$ и U_k . Снижение давления воздуха уменьшает его электрическую прочность (§ 31) и приводит к уменьшению напряжения короны и перекрытия. При остаточном давлении порядка нескольких миллиметров это уменьшение может быть до двух раз, по сравнению с величинами $U_{\text{пер}}$ и U_k при нормальном давлении.

приводит к расширению области короны в направлении второй обкладки; при некотором напряжении $U_{\text{ск}}$, меньшем чем $U_{\text{пер}}$, но большем чем U_k , на закраине появляются скользящие разряды, имеющие вид разветвленных ярко светящихся искр, возникающих в различных точках у края обкладки и заканчивающихся не доходя до второй обкладки (рис. 111). При дальнейшем повышении напряжения до $U_{\text{пер}}$ скользящие разряды прорастают до второй обкладки, переходя в полное перекрытие. Влияние формы поля и частоты на величину U_k и $U_{\text{пер}}$ для керамического конденсатора диаметром 30 мм и высотой 17 мм показано в табл. 6. У образцов с неоднородным полем на поверхности диска нанесены обкладки диаметром 20 мм; для выравнивания поля в диске с

**Влияние частоты и выравнивания поля у края обкладок
на напряжение короны и перекрытия для керамического конденсатора
(по Н. П. Богородицкому)**

Характеристика конденсатора	Частота	Резко неоднородное поле	Выровненное поле
Напряжение короны в кв	50 гц	3—4	—
То же	1 Мгц	2—3	—
Напряжение перекрытия в кв.	50 гц	20	20—25
То же	1 Мгц	3—4	15—18
Напряженность E_T при перекрытии в кв/мм	50 гц	0,74	0,74—0,92
То же	1 Мгц	0,11—0,15	0,56—0,67

Зависимость явления поверхностного разряда при неоднородном поле от различных факторов удобно рассмотреть, пользуясь эквивалентной схемой рис. 111, г. Здесь C_d — емкость через толщину диэлектрика, рассчитанная на 1 см^2 и зависящая от толщины и диэлектрической проницаемости ϵ_d диэлектрика; C_c — емкость через окружающую среду, также рассчитанная на 1 см^2 и зависящая от ϵ_c среды и коэффициента k , учитывающего форму поля рассеивания; $R_{об}$ — объемное сопротивление на 1 см^2 , зависящее от $\rho_{об}$ и d ; $R_{пов}$ — поверхностное сопротивление диэлектрика, рассчитанное на 1 см^2 (т. е. $\rho_{пов}$).

Исследуя схему рис. 111, г, М. И. Мантров¹ вывел следующие выражения при постоянном напряжении для величин напряжения начала короны, напряжения скользящих разрядов и напряжения перекрытия:

$$U = E_0 \sqrt{\frac{\rho_{об} d}{\rho_{пов}}} \operatorname{th} \left(\sqrt{\frac{\rho_{пов}}{\rho_{об} d}} \Delta l \right), \quad (163)$$

при переменном напряжении для тех же величин при условии высоких значений $\rho_{об}$ и $\rho_{пов}$, когда возможно пренебречь активными утечками по сравнению с емкостными,

$$U = E_0 \sqrt{\frac{k \epsilon_c d}{\epsilon_d}} \operatorname{th} \left(\sqrt{\frac{\epsilon_d}{k \epsilon_c d}} \Delta l \right). \quad (164)$$

В формулы (163) и (164) значения Δl и d подставляются в см, $\rho_{об}$ — в ом·см, $\rho_{пов}$ — в ом, Δl — ширина закраины (длина пути разряда по закраине); E_0 — напряженность поля у края обкладки, соответствующая началу короны, появлению скользящих разрядов или перекрытию. Для того чтобы практически пользоваться формулами (163) и (164), надо найти из опыта при каких-либо известных значениях параметров d , Δl , $\rho_{об}$, $\rho_{пов}$, ϵ_d и ϵ_c величину U , соответствующую, например, началу скользящих разрядов,

¹ М. И. Мантров. — «Электричество», 1940, № 9, с. 54—56.

и вычислить соответствующее значение E_0 ; далее, пользуясь этим значением E_0 , можно рассчитать по этим формулам значение $U_{ск}$, соответствующее появлению скользящих разрядов и при других значениях указанных выше параметров.

Анализ формул (163) и (164) позволяет сделать выводы о факторах, влияющих на явление поверхностного разряда. Величина закраины Δl входит в формулы под знаком гиперболического тангенса. Характер зависимости $\text{th } x = f(x)$, приведенный на рис. 112, а показывает, что с увеличением ширины закраины следует ожидать сначала близкого к линейному, а затем замедленного возрастания напряжения короны, напряжения скользящих разрядов и напряжения перекрытия. Это подтверждается опытом, как показывает рис. 112, б. Значение толщины диэлектрика входит

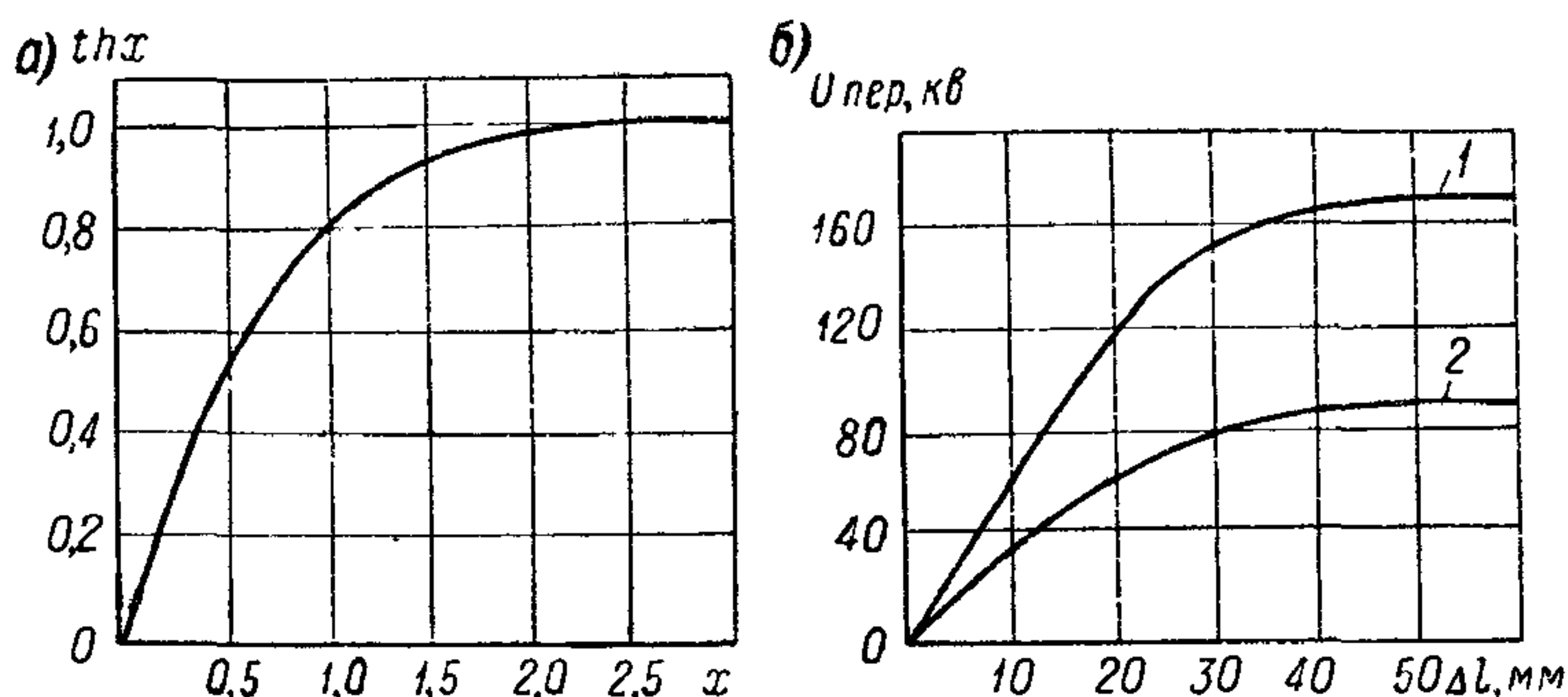


Рис. 112. Зависимость гиперболического тангенса от аргумента (а) и зависимость напряжения перекрытия от величины закраины в бумажномасляном конденсаторе (б).

1 — постоянное напряжение; 2 — переменное, частота 50 гц.

в формулы под знаком корня квадратного дважды: в виде множителя и под знаком th в виде делителя. Поскольку основное влияние будет оказывать множитель, надо ожидать, что значения U , $U_{ск}$ и $U_{пер}$ должны увеличиваться примерно пропорционально \sqrt{d} или, иными словами, $d^{0,5}$; опытные данные дают пропорциональность между U_k , $U_{ск}$ и $U_{пер}$ и величиной d^n , где обычно $n \approx 0,44 \div 0,46$.

При увеличении ϵ_d значения напряжений U_k , $U_{ск}$ и $U_{пер}$ должны уменьшаться (в случае работы при переменном напряжении). Из опыта была установлена связь между напряжением скользящих разрядов и величиной емкости C_d , отнесенной к единице поверхности, пропорциональной отношению ϵ_d/d ; при работе на воздухе было найдено:

$$U_{ск} = \frac{1,355 \cdot 10^{-4}}{C_d^{0,44}}, \quad (165)$$

где $U_{ск}$ — в кВ, а C_d — в ф/см². Из формулы (165) следует, что напряжение $U_{ск}$ должно изменяться примерно обратно пропор-

ционально $\sqrt{\epsilon_d/d}$, т. е. обратно пропорционально $C_d^{0,5}$, что удовлетворительно согласуется с опытом. Для напряжения начала короны также получен был близкий результат; при работе на воздухе было найдено

$$U_K = \frac{164}{\left(\frac{\epsilon_d}{d}\right)^{0,46}}. \quad (166)$$

Изменение окружающей среды — переход от воздуха к жидкому диэлектрику дает увеличение ϵ_c и снижение $\rho_{\text{пов}}$; согласно формулам (163) и (164) это должно давать повышение U_K , $U_{\text{ск}}$ и $U_{\text{пер}}$ как при переменном, так и при постоянном напряжении, что и наблюдается на практике. Следует иметь в виду, что при использовании вместо жидкости твердых заливочных масс, например церезина, благодаря его усадке у краев обкладок могут образовываться воздушные полости; поэтому при подсчете U_K при твердой заливке следует ориентироваться на расчетные формулы и опытные данные, соответствующие работе на воздухе. То же относится к применению полужидких масс, например вазелина, особенно при пониженных температурах. Так, при испытании дисков из сегнетокерамики толщиной 1 мм с закраиной 2 мм были получены следующие напряжения начала короны (в вольтах, при частоте 50 гц) (по Д. М. Казарновскому):

Среда	Температура, °C	Напряжение начала короны при давлении, мм рт. ст.	
		100	760
Воздух	20	520	900
Вазелин	3	600	950
»	20	750	1000
»	40	1250	1400
Масло	20	1500	1950

Согласно рис. 112, при высоких рабочих или испытательных напряжениях необходимая ширина закраины резко возрастает. В связи с этим при наличии неоднородного поля у края обкладки оказывается необходимым разбивать высоковольтный конденсатор на ряд последовательно включаемых секций с таким расчетом, чтобы при напряжении, приходящемся на каждую секцию, мы находились в пределах линейного участка зависимости рис. 112. При изготовлении конденсатора высокого напряжения из гибкого листового диэлектрика (бумаги или синтетической пленки) можно резко повысить напряжение перекрытия, создавая барьер на пути разряда, как показано на рис. 113. В случае керамических конденсаторов увеличение пути разряда и повышение напряжения перекрытия можно обеспечить соответствующим изменением

конфигурации конденсатора и величины так называемого угла разворота обкладок θ рис. 114. Влияние этого угла

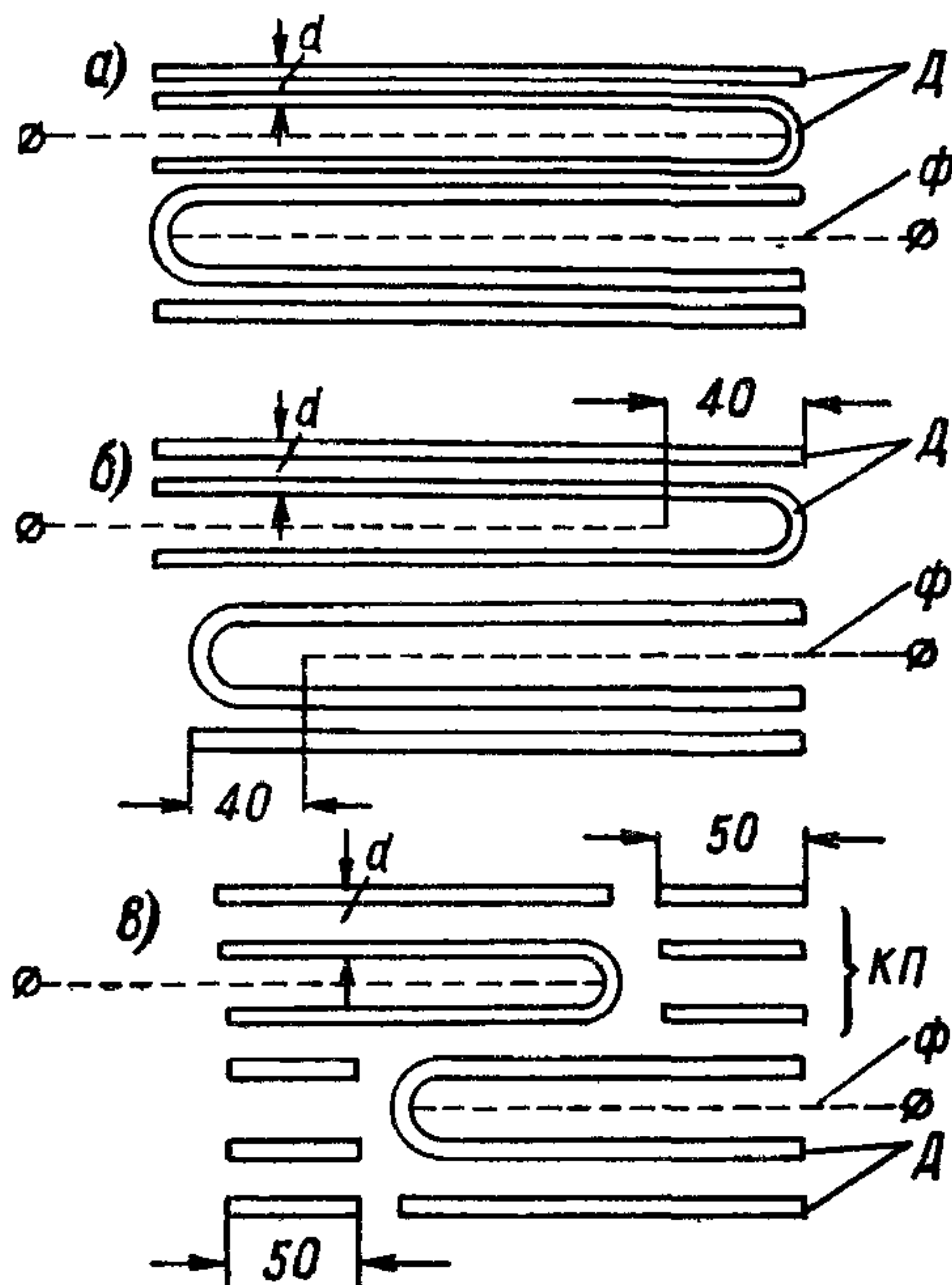


Рис. 113. Применение барьеров в бумажно-масляном конденсаторе ручной сборки для повышения разрядного напряжения по закраине: а — край обкладки доходит до барьера: $U_{пр} = 166 \text{ кВ}$; б — край обкладки не доходит до барьера $U_{пр} = 215 \text{ кВ}$; в — применены компенсирующие прокладки КП (д — диэлектрик, ф — фольга), $U_{пр} = 267 \text{ кВ}$.

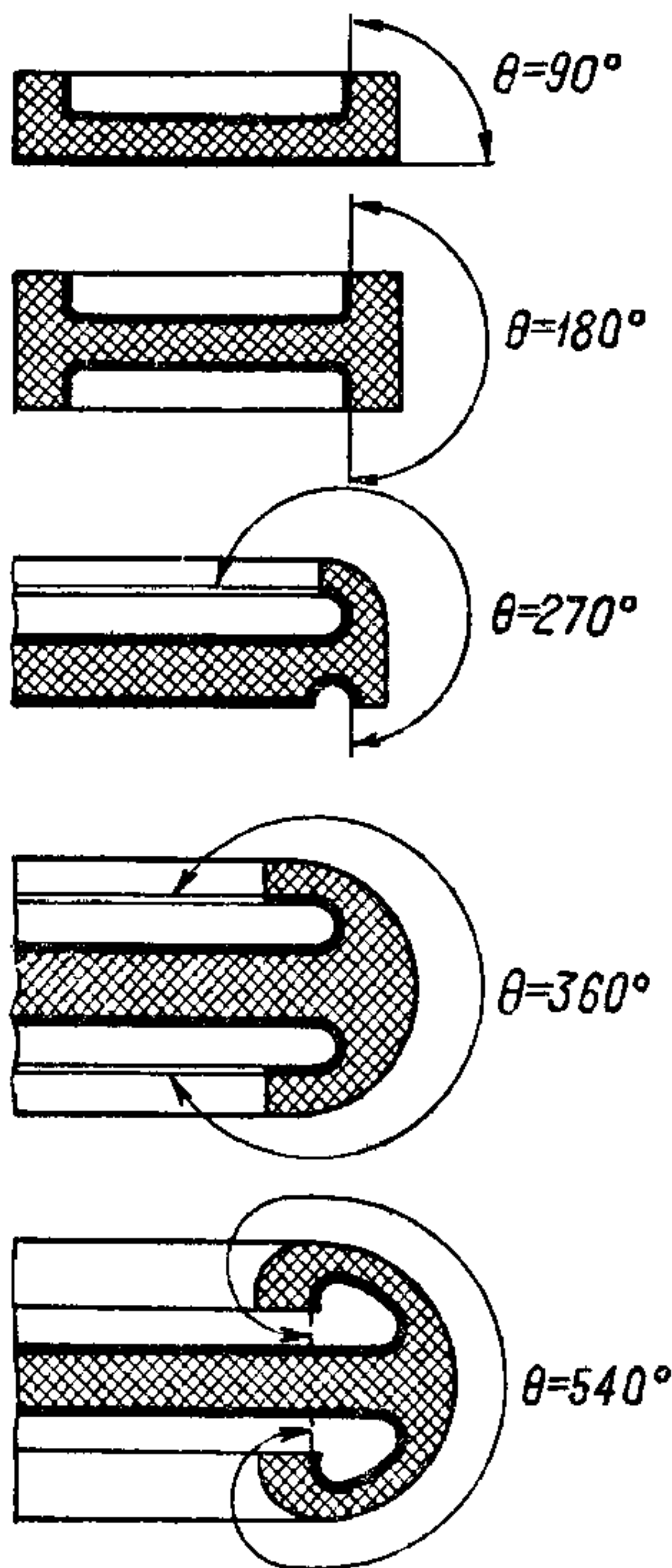


Рис. 114. Различные значения угла разворота в керамических конденсаторах высокого напряжения.

на напряженность на закраине, при которой происходит перекрытие, при высокой частоте показано ниже (по В. А. Гедзюну):

Угол разворота θ	90	180	270	360	540
Напряженность при перскрытии $E_{т}$, кв/мм.	0,58	0,65	0,70	0,75	0,86

При выборе размера закраин для обычного случая неоднородного поля у края обкладки и относительно небольшого испытательного напряжения конденсатора (или конденсаторной секции) можно считать, что мы находимся на прямолинейном участке зависимости рис. 112, а, и принимать, что значения $U_{ск}$ и $U_{пер}$ будут пропорциональны ширине закраины; при этом величину

закрайны следует увеличивать пропорционально возрастанию испытательного напряжения $U_{ис}$, на значение которого надо ориентироваться при выборе закраины:

$$\Delta l = k_3 \cdot U_{ис}.$$

Здесь Δl — в мм, $U_{ис}$ — в в и коэффициент закраины k_3 — в мм/в.

Коэффициент закраины представляет собой величину, обратную допускаемому значению средней напряженности поля на поверхности закраины E_T (в/мм).

При выборе закраины необходимо, очевидно, исходить из недопустимости перекрытия по закраинам при воздействии на конденсатор испытательного напряжения; обычно следует считать недопустимым и появление скользящих разрядов при воздействии $U_{ис}$; с учетом возможного разброса значений напряжения $U_{ск}$ от среднего значения, в этом случае можно принимать $U_{ис} \leq 0,75—0,80 U_{ск}$. В некоторых случаях, особенно для конденсаторов с органическим диэлектриком, следует считать недопустимым и появление короны при воздействии испытательного напряжения; во всяком случае ее не должно быть при рабочем напряжении, т. е. условие: $U_{раб} < U_K$ является обязательным и для конденсаторов с неорганическим диэлектриком.

В плоских конденсаторах мы имеем дело с двумя значениями пути разряда по закраинам (рис. 2, б, выше): в первом случае (в направлении длины обкладки a) путь разряда примерно равен ширине закраины: $l_p = \Delta l + d \approx \Delta l$; во втором случае (в направлении ширины обкладки b) превышает ее примерно в два раза: $l_p = 2\Delta l + d \approx 2\Delta l$. (Обычно толщина диэлектрика много меньше ширины закраины и при расчете l_p ее приходится учитывать только в случае некоторых типов керамических конденсаторов.) Во втором случае ширину закраины, вычисленную по формуле, можно уменьшить в 1,5—2 раза.

В намотанных конденсаторах с выступающей фольгой (рис. 20, б, выше) путь разряда явно определяется шириной закраины Δb ; в конденсаторах со скрытой фольгой (рис. 20, а) на первый взгляд путь поверхностного разряда равен удвоенной закраине; однако в тех местах, где выходят вкладные контакты, путь разряда сокращается до величины одной закраины, и, для того чтобы избежать перекрытия, приходится брать одинаковую закраину при обоих видах намотки.

При малых значениях испытательного напряжения ширина закраины должна быть не менее некоторого значения $\Delta l_{мин}$, определяемого технологическими соображениями с учетом опасности короткого замыкания обкладок за счет их смещения в процессе изготовления конденсатора (перекос фольги в намотанных конденсаторах при их намотке, сдвиг краев металлизированного электрода в процессе металлизации и т. п.). Ориентировочные данные о порядке применяемых на практике значений k_3 и $\Delta l_{мин}$

приведены в табл. 7. В случае керамических конденсаторов можно использовать также данные табл. 6 и табличку со значениями угла θ и E_T , помня, что $k_3 = 1/E_T$.

Таблица 7

Значения коэффициента закраины и минимальной ширины закраины

Тип конденсатора	Частота	$k_3 \times 10^3, \text{ мм/в}$	$\Delta l_{\text{мин}}, \text{ мм}$
Слюдяной	Постоянный ток	1,5—2	0,5—1
Керамический ($\epsilon = 6 \div 10$)	50 гц	1—2	1—1,5
То же	1 Мгц	2—7	1—1,5
Керамический ($\epsilon = 50 \div 100$)	50 гц	1,5—3	1—1,5
То же	1 Мгц	3—10	1—1,5
Сегнетокерамический	50 гц	2—5	1—1,5
Бумажный с твердой пропиткой	Постоянный ток	3—5	1,5—2,5
Бумажный с жидкой пропиткой (небольших размеров)	То же	1,5—2	2—3
Бумажный силовой	50 гц	—	8—10

§ 40. Оценка надежности конденсаторов

Вопрос о надежности работы конденсаторов за последние годы приобрел исключительно большое значение. Это объясняется, с одной стороны, усложнением современной электронной аппаратуры, требующей применения огромного числа деталей в одном устройстве. Поскольку надежность устройства определяется произведением отдельных степеней надежности входящих в него элементов, то для того, чтобы быть уверенным в работе устройства в целом, необходимо требовать высокой надежности от каждого из элементов. С другой стороны, конденсаторы применяются сейчас в таких устройствах, к которым приходится предъявлять требования особо высокой надежности: космическая техника, подводные усилители и т. п. В качестве примера важности вопроса о надежности конденсаторов можно указать, что в справочнике MIL 217 по конденсаторам, применяемым в современной военной аппаратуре, изданном в США, отмечается, что конденсаторы составляют 25% от общего числа применяемых деталей и вызывают около 15% всех отказов аппаратуры в работе. Интересно, что половина из этого числа отказов вызывается неправильным выбором или неправильным применением конденсатора.

Под **надежностью** конденсатора понимается вероятность его безотказной работы в течение гарантированного срока службы τ_c ; эта величина обозначается $p(\tau_c)$. Ранее при оценке срока службы конденсаторов в качестве отказа рассматривали только случай пробоя конденсатора, т. е. нарушения его электрической

прочности, и находили «кривые жизни» (рис. 100, 102, 108), для построения которых использовались результаты испытаний, подобные показанным на рис. 101 и изображающие зависимость вероятности пробоя конденсатора от времени его работы при заданных значениях приложенного к нему напряжения и температуры окружающей среды. При оценке надежности эти же данные удобнее использовать в несколько ином представлении, а именно откладывать по оси ординат не сумму пробившихся образцов, а число образцов, еще сохранивших работоспособность, т. е. не вероятность пробоя (отказа конденсатора), а вероятность его успешной работы. Общий характер кривой зависимости числа работающих образцов N от времени их работы τ при заданном режиме показан на рис. 115, а. Обычно на этой кривой при достаточно большом числе одновременно испытываемых образцов можно различить три основных участка. В начале опыта на участке 1 выходят из строя дефектные образцы, наличие которых обусловлено грубыми дефектами материала или значительными нарушениями технологии. Как уже отмечалось выше (§ 31), обычное испытание конденсаторов «на пробой» кратковременным воздействием напряжения $U_{ис}$ не дает возможности полностью устранить такие экземпляры, отбраковав их при этом испытании. Участок 1 носит название периода приработки. После окончания этого периода, т. е. после гибели всех явно дефектных экземпляров, наблюдается небольшое число случайных пробоев (отказов), обусловленных случайными дефектами, вызванными неизбежной неоднородностью диэлектрика и небольшими колебаниями режимов технологии. Этот участок 2 называют периодом нормальной работы; его продолжительность определяет собой срок службы конденсаторов. По окончании этого периода начинается резкое возрастание отказов, т. е. снижение числа работоспособных конденсаторов; происходит переход к периоду износа (участок 3), в котором работа конденсаторов перестает быть надежной.

Используя кривую на рис. 115, а, можно определить современную характеристику надежности конденсаторов, а именно:

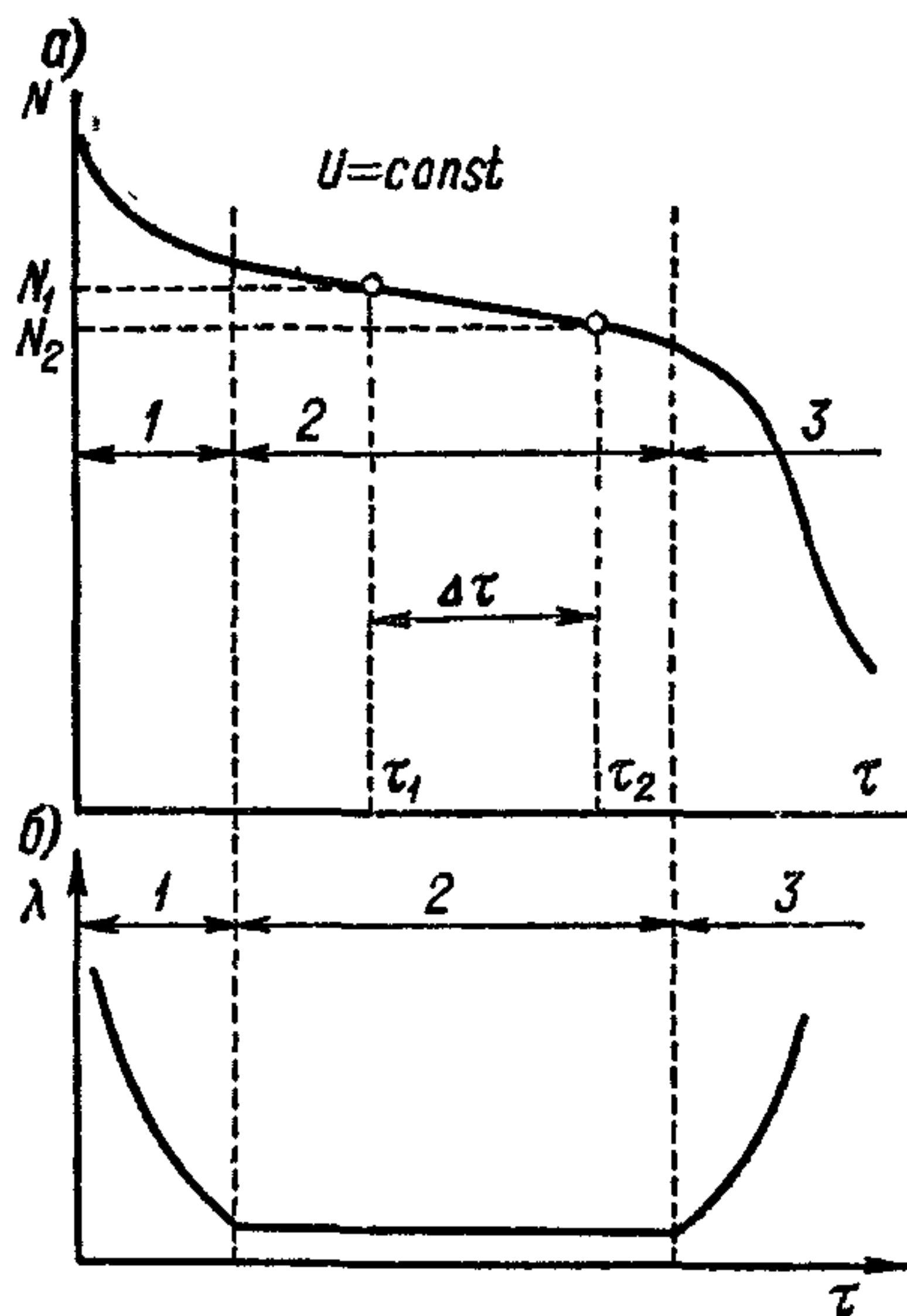


Рис. 115. Зависимость числа оставшихся годными образцов (а) и интенсивности отказов (б) от времени испытания при постоянном значении напряжения.

1 — период приработки; 2 — период нормальной работы; 3 — период износа.

интенсивность отказов λ ; эта величина представляет собой относительное количество отказов (пробоев или других повреждений) за единицу времени и рассчитывается на 1 час работы:

$$\lambda = \frac{n}{N_0 \cdot \Delta\tau} [\text{ч}^{-1}], \quad (167)$$

где n — число отказавших конденсаторов за промежуток времени испытания $\Delta\tau$, а N_0 — среднее количество работоспособных конденсаторов в испытываемой партии за этот же промежуток времени.

Обычно величину λ определяют для среднего участка 2, т. е. для периода нормальной работы. Если за время $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ число работоспособных образцов уменьшилось от N_1 до N_2 , то $n = N_1 - N_2$ и $N_0 = \frac{N_1 + N_2}{2}$.

Тогда выражение (167) принимает вид:

$$\lambda = \frac{2(N_1 - N_2)}{(N_1 + N_2)(\tau_2 - \tau_1)} [\text{ч}^{-1}]. \quad (168)$$

В зарубежной практике интенсивность отказов часто выражают в процентах на 1000 ч. Величина $\lambda = 0,1\% / 1000 \text{ ч}$ соответствует в принятых у нас единицах $\lambda = 1 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ и т. д.

При случайном характере отказов на участке нормальной работы величина λ примерно постоянна, в период приработки снижается со временем, а в период износа начинает возрастать (рис. 115, б). При постоянстве величины интенсивности отказов во времени, принимая во внимание их случайный характер, можно допустить, что вероятность распределения отказов во времени следует экспоненциальному закону. В этом случае вероятность безотказной работы конденсаторов, т. е. их надежность определяется уравнением

$$p(\tau_c) = e^{-\lambda\tau_c} \approx 1 - \lambda\tau_c < 1. \quad (169)$$

Это выражение справедливо при $p(\tau_c) \geq 0,9$.

Таким образом, если, например, интенсивность отказов $\lambda = 1 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, то надежность конденсаторов при сроке службы 10 000 ч (т. е. вероятность их безотказной работы в течение этого срока) будет равна:

$$p(\tau_c) = 1 - 1 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4 = 1 - 0,01 = 0,99.$$

Это означает, что за 10 000 ч из 100 конденсаторов может выйти из строя не более чем один конденсатор.

Иногда при испытании конденсаторов оказывается, что на участке нормальной работы величина λ не постоянна, а изменяется со временем, т. е. снижается или возрастает. В этом случае уже нельзя использовать простой экспоненциальный закон для характеристики распределения отказов во времени, а приходится

прибегать к более сложным зависимостям $p(\tau)$ от λ (закон Вейбулла и др.). При определении λ на испытание отбирается некоторое количество конденсаторов от партии, по которому мы хотим судить о качестве данной партии. Возникает вопрос, в какой степени отобранная на испытание группа образцов будет отражать качество всей партии, т. е. в какой степени полученное для этой группы значение λ будет соответствовать истинному значению λ_n для всей партии? При заданных условиях испытания величина λ определяется числом отказов n , полученным из опыта. Поэтому данный вопрос можно поставить иначе: с какой степенью точности будет воспроизводиться число n , если мы будем производить повторные испытания групп конденсаторов из той же партии?

Используя теорию вероятностей, мы можем найти так называемый доверительный интервал, характеризуемый нижним и верхним значениями $n_{\text{ниж}}$ и $n_{\text{верх}}$, между которыми с известной доверительной вероятностью p^* будут укладываться значения числа отказов, получаемые из опыта, в том числе и то, которое должно соответствовать λ_n :

$$p^* = p(n_{\text{ниж}} < n < n_{\text{верх}}). \tag{170}$$

Если, например, доверительная вероятность $p^* = 0,9$, то это означает, что при повторении испытания 100 раз в 90 случаях полученное число отказов будет лежать в пределах найденного доверительного интервала.

Для вычисления $n_{\text{ниж}}$ и $n_{\text{верх}}$ используют некоторую характеристику χ , представляющую собой функцию от доверительной вероятности и так называемой степени свободы ν , зависящей от числа отказов n . Для нижнего предела $\nu_1 = 2n$, а для верхнего $\nu_2 = 2(n + 1)$:

$$n_{\text{ниж}} = \frac{\chi^2_1}{2}, \text{ а } n_{\text{верх}} = \frac{\chi^2_2}{2}.$$

Значения χ^2 находятся по специальной таблице, которую можно найти в курсах теории вероятностей. Приводим здесь небольшую выписку из такой таблицы:

Степень свободы ν	Величины $\frac{1+p^*}{2}$ или $\frac{1-p^*}{2}$				
	0,95	0,5	0,2	0,1	0,05
—	—	—	—	—	—
4	0,711	3,357	5,989	7,779	9,488
6	1,635	5,348	8,558	10,645	12,592
8	2,733	7,324	11,030	13,362	15,507
10	3,94	9,363	13,442	15,987	18,307
—	—	—	—	—	—

Значение χ_1^2 для вычисления $n_{\text{ниж}}$ находится из этой таблицы по значениям ν_1 и $\frac{1+p^*}{2}$, а значение для вычисления $n_{\text{верх}}$ — по значениям ν_2 и $\frac{1-p^*}{2}$.

Пример. Пусть $n = 4$ и $p^* = 0,9$, тогда имеем:

$$\nu_1 = 2 \cdot 4 = 8; \quad \nu_2 = 2 \cdot (4 + 1) = 10; \quad \frac{1+p^*}{2} = 0,5 \cdot (1 + 0,9) = 0,95 \quad \text{и} \\ \frac{1-p^*}{2} = 0,5 \cdot (1 - 0,9) = 0,05.$$

Находим из таблицы при значениях $\nu_1 = 8$ и $0,95$ $\chi_1^2 = 2,733$ и при $\nu_2 = 10$ и $0,05$ $\chi_2^2 = 18,307$. Вычисляем границы доверительного интервала:

$$n_{\text{ниж}} = \frac{2,733}{2} = 1,366 \quad \text{и} \quad n_{\text{верх}} = \frac{18,307}{2} = 9,153.$$

Предельные значения интенсивности отказов λ при этих значениях числа отказов, если объем испытания $N\tau$ принять равным $4 \cdot 10^{-6}$ штук-час, будут равны:

$$\lambda_{\text{ниж}} = \frac{4,366}{4 \cdot 10^{-6}} = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1} \quad \text{и} \quad \lambda_{\text{верх}} = \frac{9,153}{4 \cdot 10^{-6}} = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}.$$

Таким образом, истинное значение интенсивности отказов $\lambda_{\text{и}}$ должно лежать в пределах:

$$0,55 \cdot 10^{-6} < \lambda_{\text{и}} < 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$$

при доверительной вероятности 0,9, или 90%.

Если воспользоваться выражением (169), то можно найти и пределы надежности данного типа конденсаторов по результатам этого испытания (приняв срок службы, скажем, $\tau_c = 1000$ ч). Нижний предел надежности $P(\tau_c)_{\text{ниж}} = 1 - 0,55 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 = 0,99770$, верхний предел надежности $P(\tau_c)_{\text{верх}} = 1 - 2,3 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 = 0,99945$.

Из таблички значений χ^2 видно, что при заданном значении доверительной вероятности p^* при уменьшении степени свободы ν , т. е. при уменьшении найденного из опыта числа отказов, интервал между значениями χ_1^2 для нижнего и χ_2^2 для верхнего предела увеличивается, т. е. увеличивается доверительный интервал. Поэтому, чтобы получить значение λ в более узких пределах с достаточной доверительной вероятностью, желательно ставить опыт так, чтобы получить большее число отказов, т. е. большее количество информации.

При малых значениях λ это затруднительно, так как требует или применения большого числа образцов в испытываемой группе, или значительного удлинения испытания. Практически обычно стремятся получить n не менее 4.

Мы уже отмечали, что ранее качество конденсаторов в отношении их надежности определялось только по отказам, вызванным нарушением электрической прочности, т. е. пробоем диэлектрика. Теперь понятие отказа конденсатора расширено, и под ним понимают все случаи, когда конденсатор оказывается неработоспособ-

ным, не только по причине пробоя, но и по другим причинам. Различают два типа отказов: катастрофические отказы («пробой», т. е. короткое замыкание обкладок — емкость стала равной бесконечности, и «обрыв», т. е. отсоединение вывода от обкладки — емкость нуль) и отказы по уходу параметров. Во втором случае имеются в виду такие изменения электрических характеристик конденсатора (емкость, сопротивление изоляции, угол потерь), которые делают его работу при заданном его назначении недостаточно удовлетворительной. Ясно, что отказы по уходу параметров должны определяться по отношению к установленным допускаемым пределам изменения параметров, которые зависят от назначения конденсатора. Например, для фильтрового конденсатора можно допустить относительно большой уход емкости от исходного значения, тогда как для конденсатора в настроенном колебательном контуре уже небольшой уход емкости может быть недопустимым. Отказы этого типа могут быть связаны с внезапным или постепенным изменением параметров. Во втором случае наступление отказа можно заранее предугадать, если вести систематическое наблюдение за изменением параметров конденсаторов во времени; в первом случае этого сделать нельзя и отказ не удастся предупредить какой-либо профилактикой.

Появление отказов при работе конденсаторов связано прежде всего с воздействием напряжения, которое может вызывать старение диэлектрика и привести к пробое конденсатора.

Длительная работа под напряжением в случае металлизированных конденсаторов может также приводить к нарушению контактного узла и к появлению «обрыва». В том и другом случае воздействие температуры ускоряет происходящие разрушительные процессы и увеличивает количество катастрофических отказов. Повышенная температура способствует также повышению числа отказов по причине ухода параметров. Воздействие влажности окружающей среды (§ 42), особенно опасное для негерметизированных конденсаторов, может вызывать как катастрофические отказы (при одновременном воздействии напряжения), так и отказы по уходу параметров (снижение постоянной времени, увеличение угла потерь, возрастание емкости). Механические воздействия (тряска, вибрация, удары) опасны прежде всего из-за возможности появления «обрывов» вследствие механического разрушения соединительных проводников. Систему крепления конденсаторов следует выбирать поэтому с таким расчетом, чтобы исключить появление механического резонанса между собственной частотой колебаний закрепленного конденсатора и частотой тряски или вибрации.

Поскольку основными факторами, сильно влияющими на число отказов и на величину интенсивности отказов λ , являются напряжение U и температура t , было предложено проводить ускоренные

испытания при проверке надежности конденсаторов, применяя повышенные значения напряжения и температуры. При этом использовали опыт, накопленный при снятии «кривых жизни» конденсаторов в процессе изучения их длительной электрической прочности. Для того чтобы перестроить кривую $N = f(\tau)$ (рис. 115, а) с одного режима испытания при значениях U_1 и t_1 на другой режим при U_2 и t_2 рекомендовалось пересчитывать значения τ по формуле (162), используя указанные выше значения n и k . Надо при этом иметь в виду, что не все отказы обусловлены воздействием напряжения и температуры (например, «обрыв» от воздействия механических усилий может произойти и в отсутствие напряжения, равно как и ухудшение параметров конденсатора при его увлажнении в условиях хранения без напряжения). Это обстоятельство ограничивает возможность применения формулы (162) и позволяет ожидать от нее только весьма приближенных результатов.

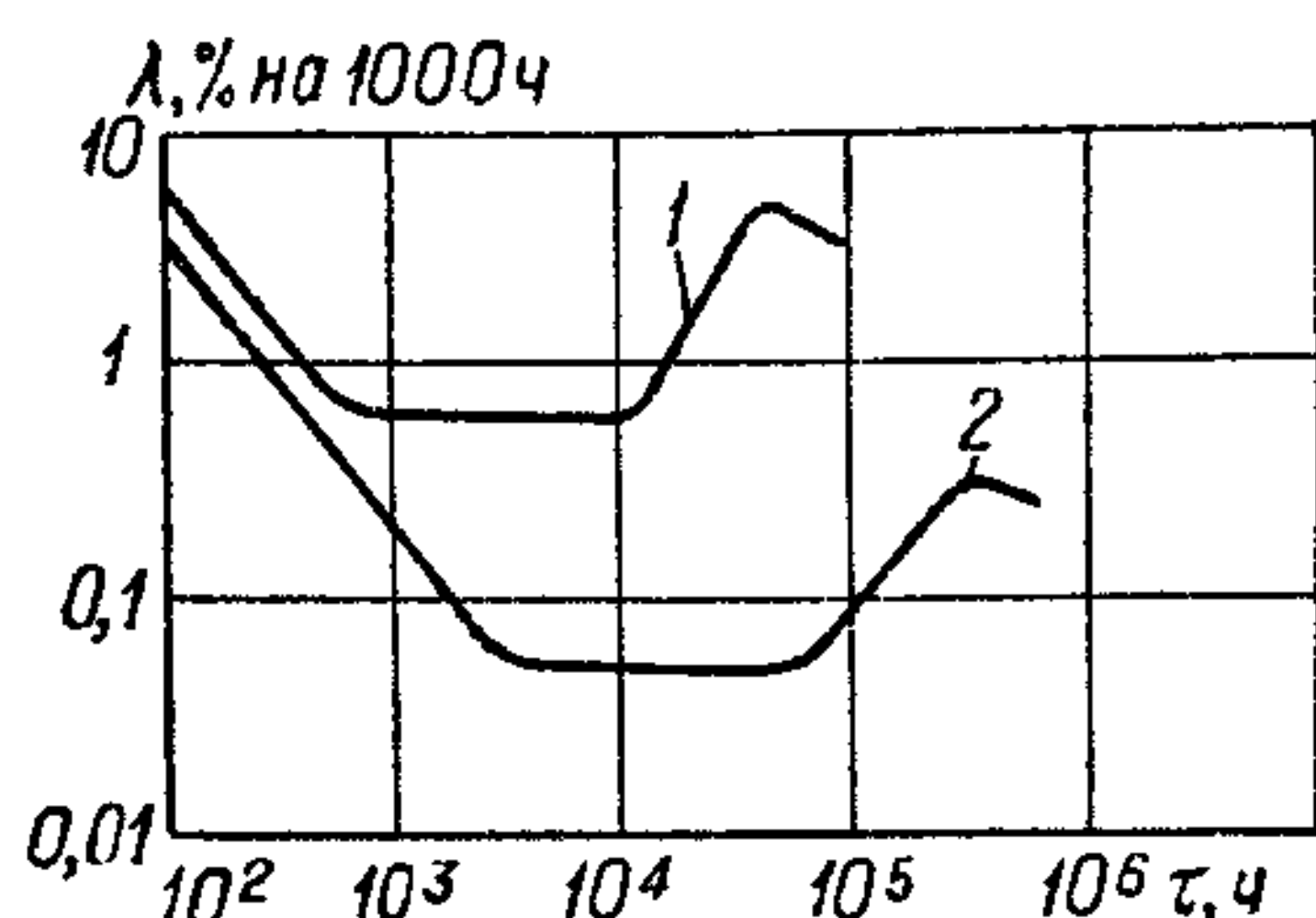


Рис. 116. Зависимость интенсивности отказов конденсаторов от времени их работы при нормальном режиме (1) и при облегченном (2) режиме, рассчитанном на снижение интенсивности отказов на один порядок величины.

саторов при нормальном режиме (1) и при облегченном режиме (2), причем условия облегчения подобраны с таким расчетом, чтобы λ снизилась в 10 раз. При таком снижении λ срок службы, о котором можно судить по времени до начала периода износа (подъем значений λ), возрос от 10^4 ч почти до 10^5 ч, т. е. также примерно в 10 раз. Поэтому для приближенных расчетов изменения интенсивности отказов при изменении режима работы конденсаторов или режимов их испытания иногда используют ту же формулу (162), подставляя в нее вместо отношения сроков службы τ_1/τ_2 соответствующее отношение интенсивностей отказов λ_2/λ_1 .

Современное конденсаторостроение в условиях массового производства для обычных типов конденсаторов обеспечивает значения λ порядка 10^{-5} — 10^{-6} ч⁻¹, которые соответствуют условиям работы при нормальном напряжении и верхнем пределе рабочей температуры. Для сравнительной оценки надежности конденсаторов различных типов с надежностью других деталей наземного электрооборудования приводятся средние значения интен-

сивности отказов при максимальной нагрузке по английским данным 1964 г.

Тип изделия	Интенсивность отказов $\lambda \times 10^6, \text{ч}^{-1}$
Бумажные конденсаторы	1,0
Металлобумажные конденсаторы	0,5
Пленочные (неполистирольные конденсаторы)	0,2
Полистирольные конденсаторы .	0,05
Слюдяные конденсаторы	0,3
Керамические	0,1
Электролитические алюминиевые конденсаторы	5,0
Электролитические танталовые фольговые конденсаторы	0,7
Электролитические танталовые жидкостные объемнопористые конденсаторы	0,3
Танталовые оксиднополупроводниковые конденсаторы	0,1
Резисторы разных типов	0,3—2,0
Радиолампы разных типов	5,0—20,0
Транзисторы	0,1—1,0

Приведенные здесь данные дают значения λ для разных типов конденсаторов порядка 10^{-6} — $10^{-7}, \text{ч}^{-1}$ т. е. несколько лучше средних данных, указанных выше; по-видимому, в данном случае могло сказаться различие в значениях верхнего предела температур. Следует отметить, что если электролитические алюминиевые конденсаторы старых типов имели сниженную надежность, то новые типы танталовых конденсаторов по надежности не хуже бумажных и пленочных конденсаторов. Интенсивность отказов для всех типов конденсаторов много ниже, чем для радиоламп и, в среднем, для многих типов несколько меньше, чем для резисторов и полупроводниковых приборов.

Снижение рабочего напряжения в сравнении с номинальным и ограничение верхнего предела температуры цифрой 40°C дают возможность снизить интенсивность отказов до 10^{-8} — 10^{-7}ч^{-1} (табл. 8).

Данные табл. 8 показывают, что зависимость λ от напряжения может быть различна для разных типов конденсаторов. Так, она резко ослаблена для керамических конденсаторов в сравнении с бумажными и слюдяными, что характеризуется также пониженными значениями показателя степени n в формулах, характеризующих процесс старения конденсаторов этого типа (см. табл. 5, выше). Для алюминиевых сухих конденсаторов снижение напряжения не дает снижения λ , так как для них процесс старения обычно связан с потерей летучих составляющих электролита,

которая происходит независимо от приложенного напряжения. Для танталовых конденсаторов, в соответствии с данными § 36, величина λ заметно зависит от напряжения.

Таблица 8

Интенсивность отказов ($\times 10^7, \text{ч}^{-1}$)
для различных типов конденсаторов английского
производства при температуре 40°C и различных
напряжениях

Тип конденсатора	Напряжение в % от номинального		
	10	50	100
Бумажный	0,1	1,0	10,0
Керамический	0,1	0,1	0,4
Слюдяной	0,1	0,4	5,0
Электролитический:			
алюминиевый сухой . . .	—	—	5,0
танталовый сухой	0,2	1,0	7,0
танталовый жидкостный	0,1	0,5	4,0
оксиднополупроводнико- вый	0,5	2,0	3,0

Для того чтобы получить значения λ порядка 10^{-7} — 10^{-8}ч^{-1} при номинальном напряжении и повышенных температурах и добиваться еще меньших значений, порядка 10^{-9}ч^{-1} , на которых настаивают некоторые заказчики, передовые зарубежные фирмы пошли на значительную перестройку производства. Высоконадежные типы конденсаторов изготавливают отдельно от основной массы выпускаемых конденсаторов в специальных «гигиенических»¹ (обеспыленных и кондиционированных) помещениях, из материалов высокого качества, отвечающих особо жестким требованиям, по специально отработанным режимам технологии, которые должны строго соблюдаться в соответствии с картами технологического процесса. Персонал этих специальных цехов носит особую одежду и проходит инструктаж, включающий основные представления о надежности конденсаторов и о мерах ее повышения.

Естественно, что эти мероприятия повышают стоимость конденсаторов иногда в несколько раз. Следует отметить, что само определение величины λ для высоконадежных конденсаторов также связано с большими расходами, так как требует длительных испытаний весьма значительных партий конденсаторов. Так, для оценки величины λ порядка 10^{-9}ч^{-1} при получении числа отказов $n \approx 3 \div 4$, обеспечивающих минимальную необходимую до-

¹ «Гигиенические» цеха появляются теперь и у нас на ряде передовых предприятий.

верительную вероятность, согласно формуле (167) объем испытания должен быть не менее

$$N_0\tau = \frac{n}{\lambda} = \frac{3 \div 4}{1 \cdot 10^{-9}} = 3000 \div 4000 \text{ млн. шт.-часов.}$$

Фирмы, гарантирующие надежность указанного здесь порядка, накапливали такой большой объем испытания в течение ряда лет.

Поэтому к вопросу о надежности конденсаторов необходимо подходить с технико-экономической точки зрения, учитывая возрастание расходов, связанных с ужесточением требований, предъявляемых к величине интенсивности отказов.

Существование периода приработки (участок I на рис. 115) приводит к повышенному числу отказов в начальный период эксплуатации конденсаторов, т. е. к увеличению λ . В связи с этим в ряде случаев применяют предварительную тренировку конденсаторов под напряжением, для того чтобы отбраковать те экземпляры, которые имеют пониженную надежность. Если период приработки занимает при нормальном режиме 100—200 ч, то такая тренировка часто ведется при нормальном режиме, но обычно ее проводят при несколько форсированном режиме, чтобы ускорить этот процесс. Естественно, что проведение подобной операции также удорожает конденсаторы.

Как уже отмечалось выше, резкое снижение интенсивности отказов и соответствующее повышение надежности можно получать, используя конденсаторы в облегченных по напряжению и по температуре условиях работы (рис. 116, выше). Кроме того, иногда с успехом осуществляется принцип дублирования, при котором вместо одной детали (например, конденсатора) в схеме применяются две, причем при отказе одной из них автоматически включается в работу вторая, запасная, что резко повышает надежность. Так например, если в схеме используется m недублированных конденсаторов с интенсивностью отказов λ , то среднее время до первого отказа составляет

$$\tau_1 = \frac{1}{m\lambda}. \quad (171)$$

При дублировании каждого из m конденсаторов это время будет составлять:

$$\tau_1 \approx 0,88 \frac{1}{\sqrt{m} \lambda}. \quad (172)$$

Например, при $m = 100$ и $\lambda = 1 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$ в первом случае первый отказ можно ждать, в среднем, через 1000 ч, а во втором случае — только через 8800 ч.

Учитывая важность вопроса о повышении надежности конденсаторов, на конденсаторных заводах создаются лаборатории надежности, обеспечиваемые специальным оборудованием для массовых длительных испытаний конденсаторов. Как

у нас, так и за рубежом разрабатываются автоматические устройства для периодического контроля стоящих под испытанием конденсаторов, причем определяются как катастрофические отказы, так и отказы по уходу параметров. Для обработки результатов массовых испытаний в ряде случаев используются счетно-решающие электронные машины.

Проверка надежности больших силовых конденсаторов связана с трудностями, и в этом случае оценку величины λ приходится обычно делать по сведениям об отказах, получаемых при реальной эксплуатации конденсаторных батарей. Зарубежные данные (США, Швеция) дают количество отказов за год для современных силовых конденсаторов, пропитанных хлордифенилом или маслом (но с повышенным давлением в корпусе), порядка 0,1—0,2%, что соответствует интенсивности отказов $\lambda \approx 1 \div 2 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$. Эта величина такого же порядка, как и для высококачественных конденсаторов для электронной техники. Она соответствует надежно герметизированным силовым конденсаторам, изготовленным из высококачественных материалов с применением сушки и пропитки при остаточном давлении порядка $10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$ При несоблюдении этих условий надежность силовых конденсаторов может быть заметно ухудшена в сравнении с указанными здесь данными.

Глава VII

ВНЕШНИЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАБОТУ КОНДЕНСАТОРОВ

§ 41. Общие сведения о рекомендации МЭК

При изучении вопроса об электрических свойствах конденсаторов мы уже рассмотрели их зависимость от двух важнейших электрических факторов, определяющих режим работы конденсатора: **н а п р я ж е н и я и ч а с т о т ы**. Кроме того, существенное влияние на электрические свойства конденсаторов, а следовательно, и на их работу оказывают **у с л о в и я в н е ш н е й с р е д ы**, окружающей конденсатор (климатические условия), а также **м е х а н и ч е с к и е в о з д е й с т в и я** на конденсаторы, возникающие при их транспортировке, монтаже в аппаратуре и в условиях эксплуатации.

Важнейшими факторами, характеризующими воздействие климатических условий на электрические конденсаторы, являются **т е м п е р а т у р а и в л а ж н о с т ь** окружающей среды. Международная Электротехническая Комиссия (МЭК) уделила специальное внимание вопросу о классификации конденсаторов в соответствии с жесткостью предъявляемых к ним требований в отношении допускаемых пределов температуры и влажности, а также и других климатических и механических факторов.

В публикации МЭК 68 «Основные климатические и механические испытания элементов радиоэлектронной аппаратуры» предусматриваются следующие степени жесткости по предельным значениям температуры:

а) нижний предел температуры (испытание А: холод):

Степень жесткости	III	IV	V	VI	VII
Температура, °C	—65	—55	—40	—25	—10

При испытании «на холод» конденсаторы должны выдерживаться в криостате (камере холода) в течение 2 ч при точности установки заданной температуры $\pm 3^{\circ}\text{C}$. По советским нормам предусмотрена дополнительная степень жесткости IIIa: -60°C ;

б) верхний предел температуры (испытание В: «сухое тепло»):

Степень жесткости	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Температура, °C	200	155	125	100	85	70	55	40

При испытании на «сухое тепло» конденсаторы должны выдерживаться в термостате в течение 16 ч при точности установки заданной температуры $\pm 2^{\circ}\text{C}$, до 100°C включительно; при $125-155^{\circ}\text{C}$ — с точностью до $\pm 5^{\circ}\text{C}$, а при более высоких температурах — до $\pm 10^{\circ}\text{C}$. Советские нормы предусматривают еще степень жесткости «0», соответствующую температуре 250°C .

По рекомендации МЭК влагостойкость конденсаторов оценивается временем выдержки в условиях «влажного тепла» (длительное испытание С). Испытание проводят в гигростате (камере влаги) при температуре $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности 90—95 % (§ 42). Степень жесткости характеризуется продолжительностью такого испытания:

Степень жесткости	IV	V	VI	VII	VIII
Количество дней.	56	21	10	4	4 + сушка

При испытании воздух в камере должен циркулировать, не допускается ни возникновение тумана, ни конденсация воды на испытуемых конденсаторах. По советским нормам предусматривается дополнительная степень жесткости Va с продолжительностью в 30 суток.

Категория конденсатора, в зависимости от жесткости испытаний на воздействие температуры и влажности, характеризуется по рекомендации МЭК, в указанной здесь последовательности:

А/В/С. Обычно прямо указывают соответствующие цифры, например: 55/085/21, что означает: степень жесткости IV — по нижнему пределу температуры, V — по верхнему пределу температуры и V — по влагостойкости. Для оценки влияния на конденсатор высокой относительной влажности в сочетании с колебаниями температуры предусмотрено испытание Д (влажное тепло, ускоренное испытание). Испытание проводят циклами, по 24 ч. В течение каждого цикла температуру повышают сначала от $25 \pm 10^\circ \text{C}$ до $55 \pm 2^\circ \text{C}$ в течение 1,5—2,5 ч, на протяжении которых ϕ должна составлять 80—100%. В течение этого периода не должна конденсироваться вода. Далее 16 ч поддерживают температуру $55 \pm 2^\circ \text{C}$, причем не менее 4 раз в час должны быть колебания в $2\text{—}3^\circ \text{C}$ при условии, что температура сохраняется в диапазоне $53\text{—}57^\circ \text{C}$. В течение этого периода ϕ должна быть 95—100%, и на изделиях появляется влага. Далее температура снижается до $25 \pm 10^\circ \text{C}$ при относительной влажности 80—100%, вплоть до окончания цикла длительностью в 24 ч. В течение этого периода на конденсаторах не должно появляться капель воды. Степень жесткости характеризуется числом циклов, допускаемых при испытании данного типа конденсаторов при таком режиме:

Степень жесткости	IV	V	VI
Число циклов.	6	2	1 + сушка

Влияние температуры на электрические свойства конденсаторов мы уже рассмотрели выше. Этот фактор может вызывать существенные изменения емкости как обратимые, так и необратимые; он приводит к возрастанию угла потерь и снижению постоянной времени; температура сильно влияет на длительную электрическую прочность, оказывая известное влияние и на кратковременную прочность конденсаторов.

Влияние влажности окружающей среды требует особого рассмотрения совместно с проблемой влагозащиты конденсаторов. Кроме того, необходимо уделить внимание и таким внешним факторам, как воздействие грибковой плесени, давление окружающего воздуха, действие различных излучений. Рекомендации МЭК охватывают и эти факторы (за исключением действия излучений), а также и устойчивость конденсаторов к механическим воздействиям. Следует отметить, что отечественные нормы на климатические испытания составлены с учетом международных норм и во многом совпадают с документом МЭК «Публикация 68». Некоторые отличия от этого документа были отмечены выше. В ближайшее время можно ожидать выхода в свет нового ГОСТ, охватывающего климатические и механические испытания различных электротехнических изделий, в том числе и конденсаторов.

§ 42. Влияние влажности на электрические свойства конденсаторов и методы защиты от действия влажности

В окружающем конденсатор воздухе содержится то или иное количество паров воды, которое оценивается величиной абсолютной или относительной влажности воздуха. **А б с о л ю т н а я** **в л а ж н о с т ь** характеризуется количеством воды в граммах, содержащимся в 1 м^3 воздуха при данном значении температуры. Обычно пользуются значением относительной влажности воздуха φ , которая представляет собой отношение количества водяных паров в единице объема воздуха A к тому максимальному количеству водяных паров M , которое может быть растворено в воздухе при данной температуре:

$$\varphi = \frac{A}{M} \cdot 100 [\%].$$

Величина M , т. е. предельное значение растворимости водяных паров в воздухе, снижается при понижении температуры, поэтому если при температуре t_1 в некотором замкнутом пространстве величина φ была меньше 100%, то при неизменном количестве водяных паров и при охлаждении этого пространства, скажем до температуры t_2 , величина φ может повыситься до 100%, так как при неизменном A величина M снизится. При дальнейшем охлаждении ниже t_2 избыточная вода выделится в виде капель («роса»).

При оценке влагостойкости конденсаторов обычно рассматриваются следующие значения относительной влажности воздуха:

- $\varphi \approx 65\%$ — **н о р м а л ь н а я** **в л а ж н о с т ь**, соответствующая закрытым отапливаемым помещениям;
- $\varphi \approx 80\%$ — **п о в ы ш е н н а я** **в л а ж н о с т ь**, соответствующая закрытым неотапливаемым помещениям;
- $\varphi \approx 100\%$ — **в ы с о к а я** **в л а ж н о с т ь**, соответствующая работе на открытом воздухе при нормальной ($20 \pm 5^\circ \text{C}$) или при более низкой температуре;
- $\varphi \approx 100\%$ — при повышенной температуре ($40 \div 50^\circ \text{C}$) — **т р о п и ч е с к а я** **в л а ж н о с т ь**, соответствующая работе в условиях влажного тропического климата.

Хотя значение φ при высокой и при тропической влажности одно и то же, но при неизменном значении относительной влажности абсолютная влажность, т. е. величина A , в тропических условиях будет повышена, так как при повышенной температуре увеличится растворимость влаги в воздухе и повысится M .

Практически при испытаниях конденсаторов трудно поддерживать точное значение $\varphi = 100\%$, так как при небольших колебаниях температуры (в сторону ее снижения по сравнению с начальным значением) будет выделяться свободная вода в виде

капель, что изменит условия испытания. Поэтому обычно под выражением «высокая влажность» понимают значения $\varphi \approx 95-98\%$.

Вода представляет собой полярную жидкость, имеет $\epsilon \approx 80$ и высокую электропроводность ($\rho < 10^6$ ом·см). Поглощение влаги диэлектриком конденсатора, если диэлектрик гигроскопичен, приводит к некоторому возрастанию емкости (поскольку большинство диэлектриков, применяемых в конденсаторостроении, имеет $\epsilon < 80$) и к резкому снижению сопротивления изоляции (поскольку для обычных диэлектриков $\rho > 10^{10}-10^{12}$ ом·см).

Вследствие возрастания проводимости диэлектрика, поглотившего влагу, возрастает значение $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора, особенно в области повышенных температур, и снижается его электрическая прочность за счет облегчения возможности развития в нем теплового пробоя. При постоянном напряжении поглощение влаги способствует развитию в диэлектрике электрохимических явлений, обуславливающих старение диэлектрика. Можно ожидать, что даже следы влаги, проникшей в диэлектрик, могут приводить к снижению ионизирующего напряжения конденсатора, т. е. усиливать процесс его старения и при переменном напряжении.

Рис. 117, а показывает снижение электрической прочности, повышение угла потерь и емкости бумажного конденсатора в соответствии с ухудшением его сопротивления изоляции, обусловленным поглощением влаги из окружающего воздуха. Кривые на рис. 117, а получены для пропитанных конденсаторов и показывают, что заполнение пор бумаги пропиточной массой не может уничтожить гигроскопичность этого диэлектрика, т. е. не является достаточно надежным способом для защиты от влаги. На рис. 117, б показано влияние поглощенной влаги на температурную зависимость емкости бумажных конденсаторов, пропитанных вазелином. Кривая 1 — образец с постоянной времени 17 000 ом·ф, неувлажненный; кривая 2 — сильно увлажненный образец, $R_{из}C = 3$ ом·ф. Опыт показал, что поглощение влаги не только увеличивает емкость, но и усиливает ее зависимость от температуры.

Если диэлектрик конденсатора негигроскопичен, т. е. не имеет пористости, обуславливающей проникновение влаги внутрь диэлектрика, то это еще не исключает возможности ухудшения его электрических свойств в условиях повышенной и высокой влажности. В этом случае изменение электрических свойств конденсатора может быть вызвано о с а ж д е н и е м в л а г и н а з а к р а и н а х. Увеличение поверхностной проводимости на закраинах дает резкое снижение сопротивления изоляции и рост угла потерь (рис. 117, в); если закраина делается проводящей, т. е. дает увеличение площади обкладок на величину площади закраины, то наблюдается соответствующее возрастание емкости (рис. 117, г). Лакировка конденсатора не дала в данном случае вполне надежной

влагозащиты, и только помещая конденсатор в герметически закрытую оболочку, удалось получить достаточную устойчивость его электрических свойств. Пленка влаги на поверхности закраин

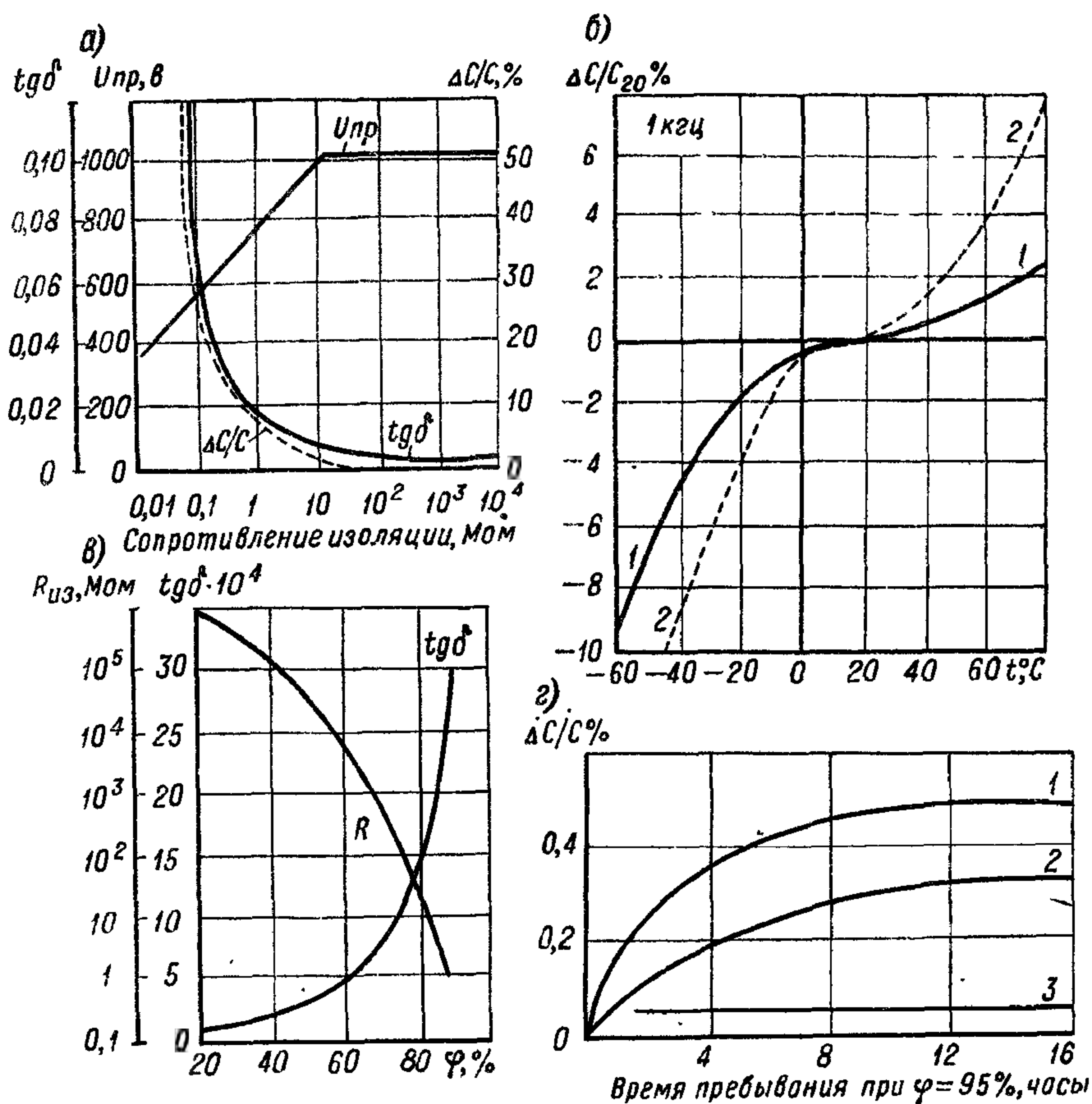


Рис. 117. Влияние влажности окружающего воздуха на электрические свойства конденсаторов: а — изменение пробивного напряжения, емкости и угла потерь бумажного конденсатора при снижении его сопротивления изоляции, вызванного поглощением влаги; б — температурная зависимость емкости бумажного конденсатора: в сухом состоянии (1) при постоянной времени 17 000 сек и в увлажненном состоянии (2) при постоянной времени 3 сек; в — зависимость угла потерь и сопротивления изоляции керамического конденсатора от влажности воздуха; г — зависимость емкости керамических конденсаторов от времени пребывания в условиях влажности 98%.

1 — пезацищенный конденсатор; 2 — покрытый лаком; 3 — герметизированный.

не уменьшает пробивной напряженности диэлектрика, но снижает разрядное напряжение и может привести к пробое по закраине.

В ряде случаев заметное ухудшение электрических свойств конденсаторов можно наблюдать уже при нормальной влажности ($\varphi \approx 65\%$), но катастрофические последствия вредного действия

влаги, попавшей в конденсатор, обычно наблюдаются при использовании последних в аппаратуре, работающей длительно на открытом воздухе ($\phi = 95 \div 100\%$), (рис. 117), особенно в тропических условиях.

Вопрос о необходимости защиты конденсаторов от воздействия влаги был поднят еще на заре конденсаторостроения, а потому имеет длинную историю, характеризующуюся разработкой и применением разнообразных средств влагозащиты конденсаторов. Эти средства можно разделить на две основные группы: влагозащита с применением органических диэлектриков (уплотненные конструкции конденсатора) и влагозащита с применением неорганических диэлектриков и металла (герметизация конструкции конденсатора).

Вторая группа методов влагозащиты (герметизация) нашла себе широкое применение только после Отечественной войны, хотя некоторые германские фирмы начали применять герметические конструкции конденсаторов и в довоенное время.

А. Влагозащита с применением органических диэлектриков. (Уплотненные конструкции). Первым мероприятием для влагозащиты конденсаторов с помощью органических материалов явилась пропитка, т. е. заполнение пор в диэлектрике и зазоров между слоями диэлектрика и обкладками какой-либо влагостойкой пропиточной массой. Пропитка воскообразными малогигроскопичными материалами: парафином и церезином давно была применена для влагозащиты одних из наиболее старых типов конденсаторов: бумажных и слюдяных. В случае слюды пропиточная масса покрывает закраины и заменяет воздух в зазорах между слюдой и обкладками; в случае бумаги пропиточная масса, кроме того, проникает и в глубь диэлектрика, заменяя воздух, находившийся в порах бумаги.

Долголетний опыт показал, что пропитка может обеспечить только временную защиту конденсатора от действия влаги, лишь задерживая проникновение влаги в конденсатор на относительно небольшой срок, но не исключая возможности этого проникновения с течением времени (кривые 1 и 2 на рис. 118). Вместе с тем, пропитка полезна как вследствие того, что пропитанные конденсаторные секции при умеренной влажности сохраняют свои электрические свойства в течение того небольшого времени, которое необходимо для процесса сборки конденсатора, так и потому, что после пропитки заметно возрастает электрическая прочность конденсатора.

Простейшим дополнительным средством влагозащиты пропитанной конденсаторной секции является покрытие ее слоем изоляционного лака. Этот способ влагозащиты получил некоторое применение за рубежом в производстве слюдяных конденсаторов; для бумажных конденсаторов он применялся редко. Опыт эксплуатации лакированных слюдяных и бумажных конденсаторов показал, что они недостаточно влагоустойчивы даже

при комнатной (нормальной) влажности. Лучшие результаты дает лакировка или покрытие эмалью в случае керамических конденсаторов, позволяя применять их при влажности порядка 60—70%, но при более высокой влажности характеристики таких конденсаторов быстро ухудшаются (рис. 117, в и г, выше).

Шагом вперед в направлении улучшения влагостойкости конденсаторов явилась заливка влагоупорным компаундом (чаще всего нефтяным битумом, реже компаундом на основе хлорнафталина) пропитанных конденсаторных секций, помещаемых в металлический или изоляционный корпус, откры-

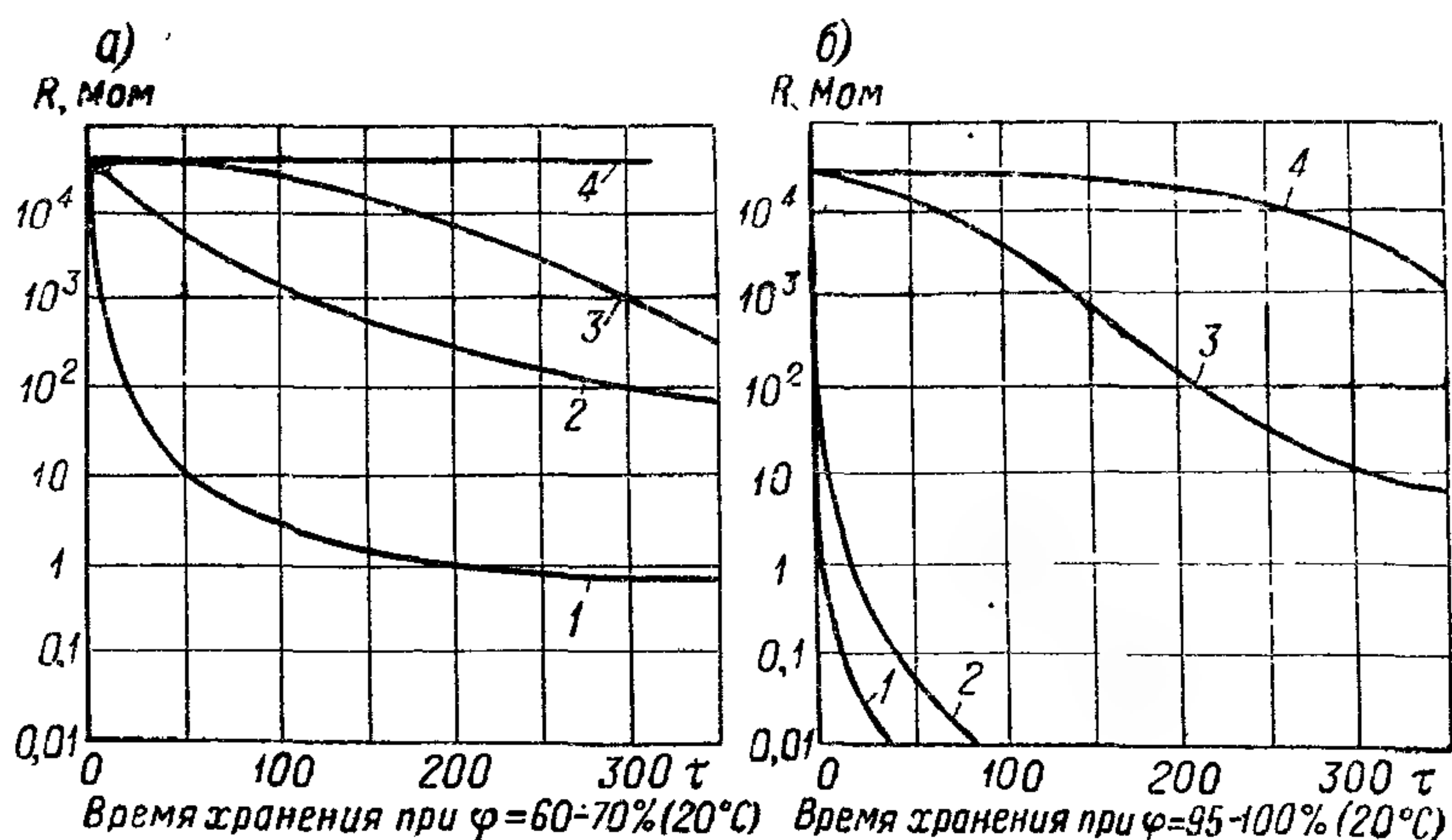
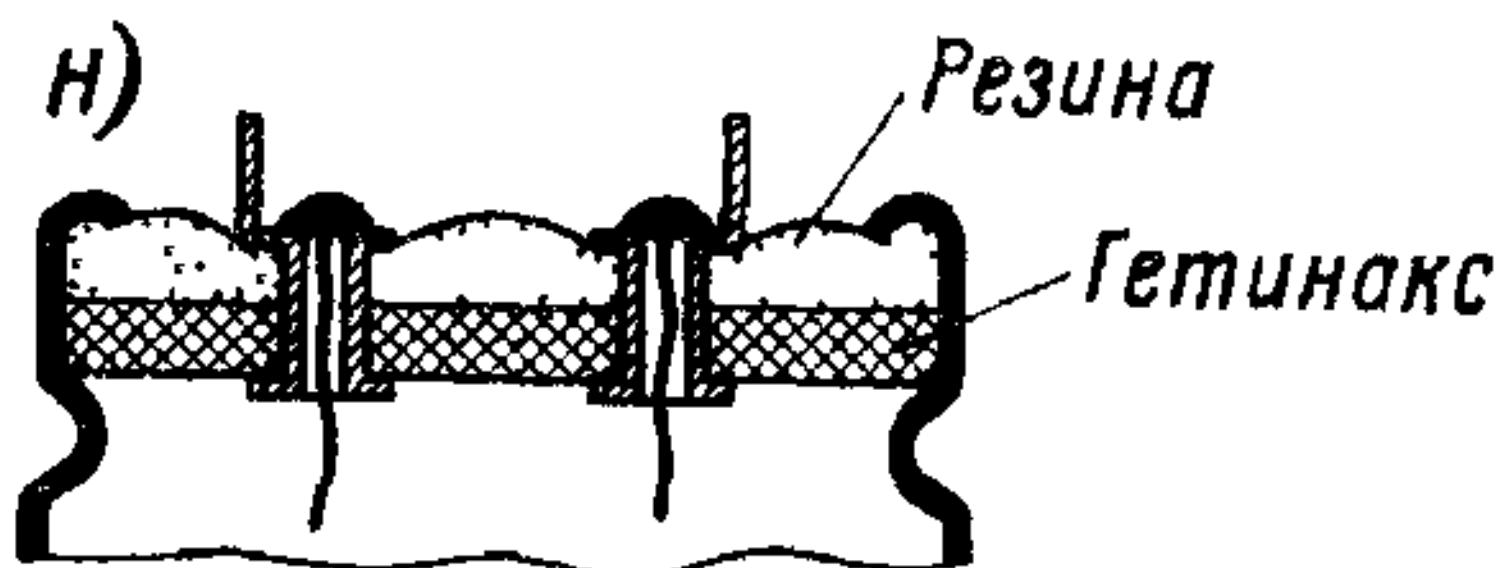
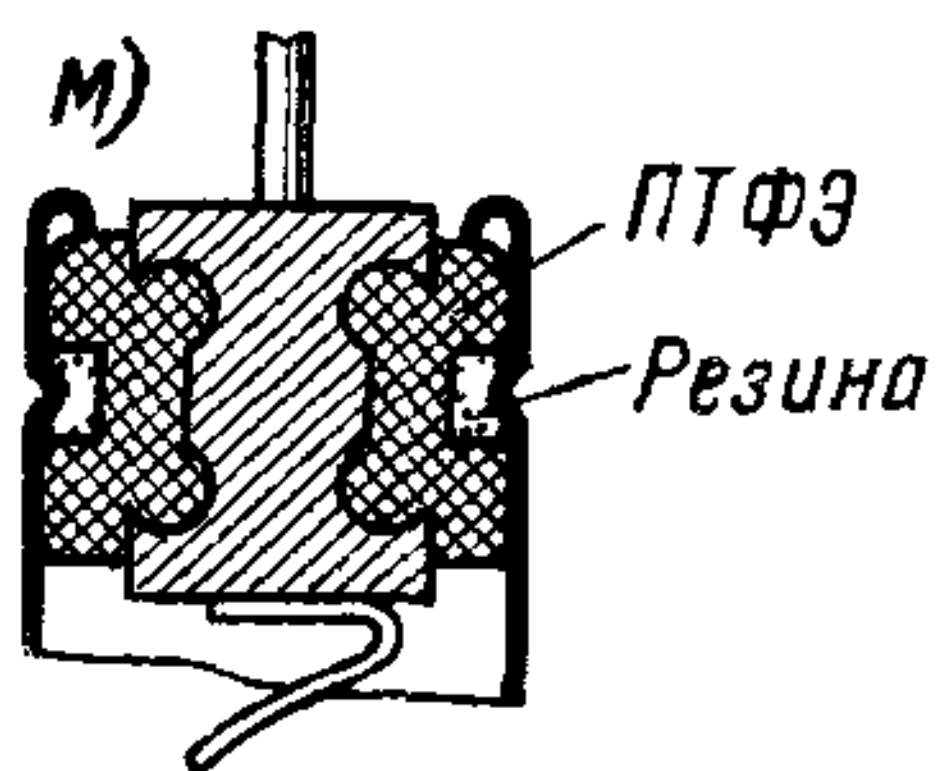
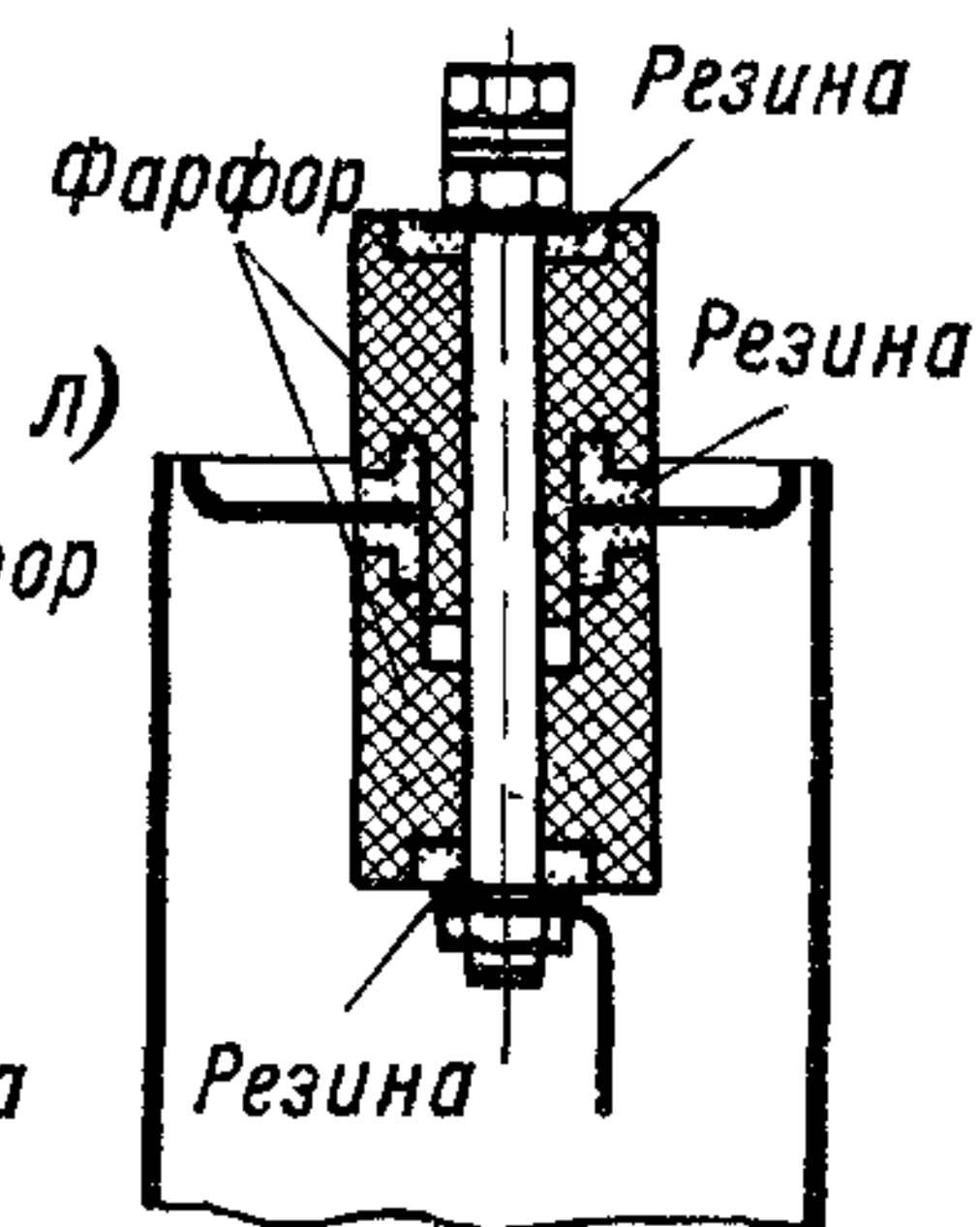
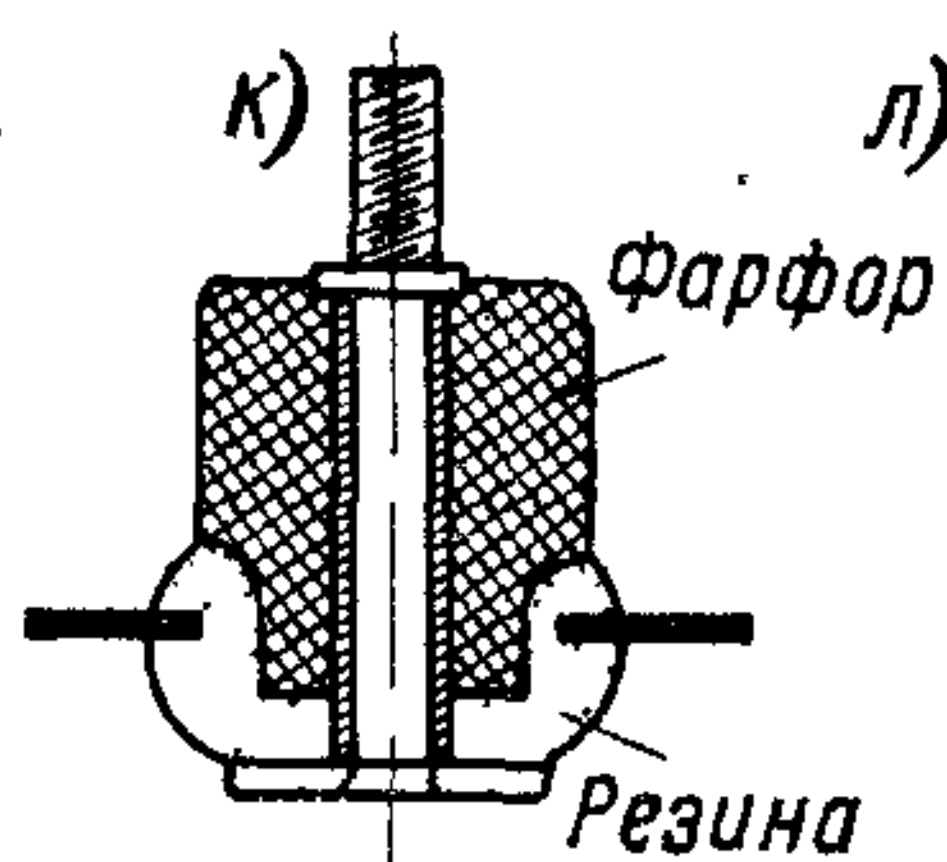
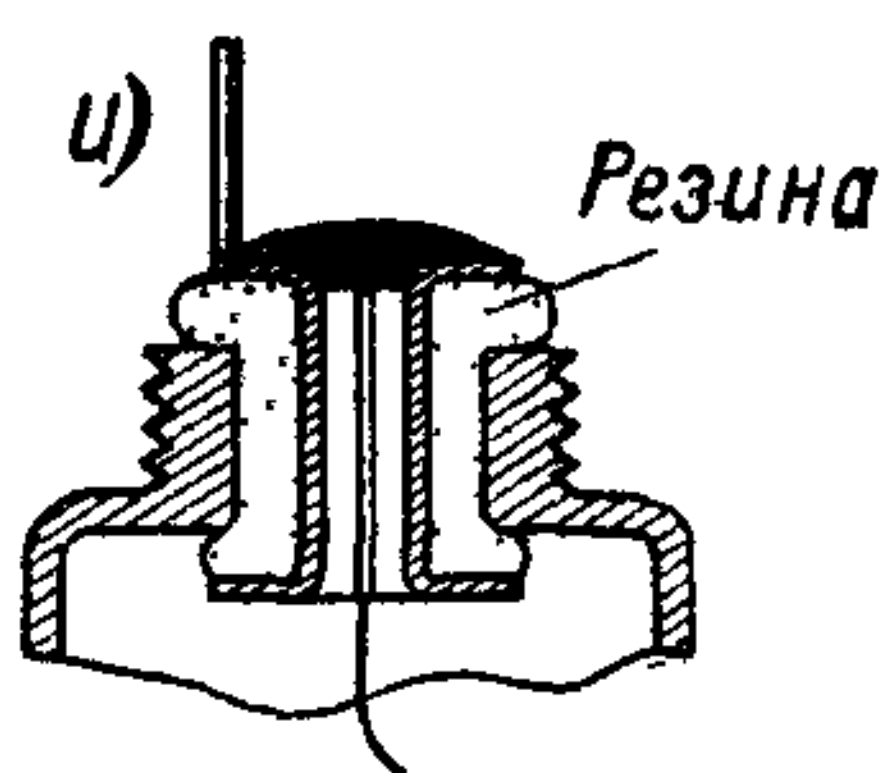
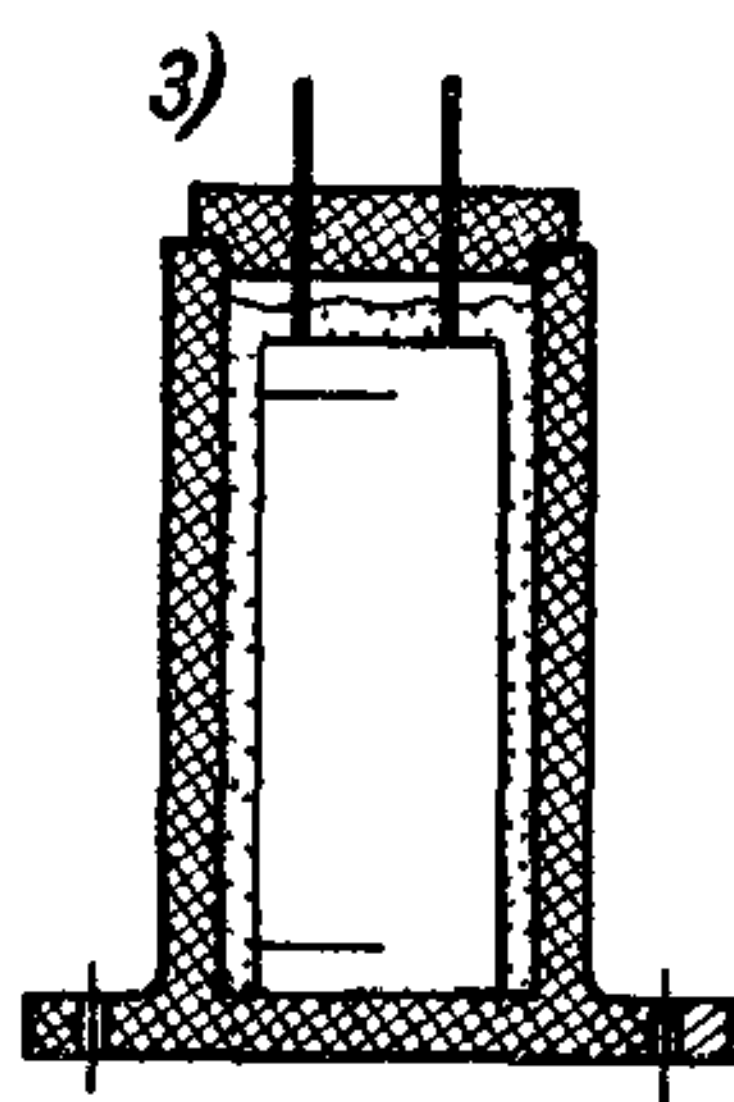
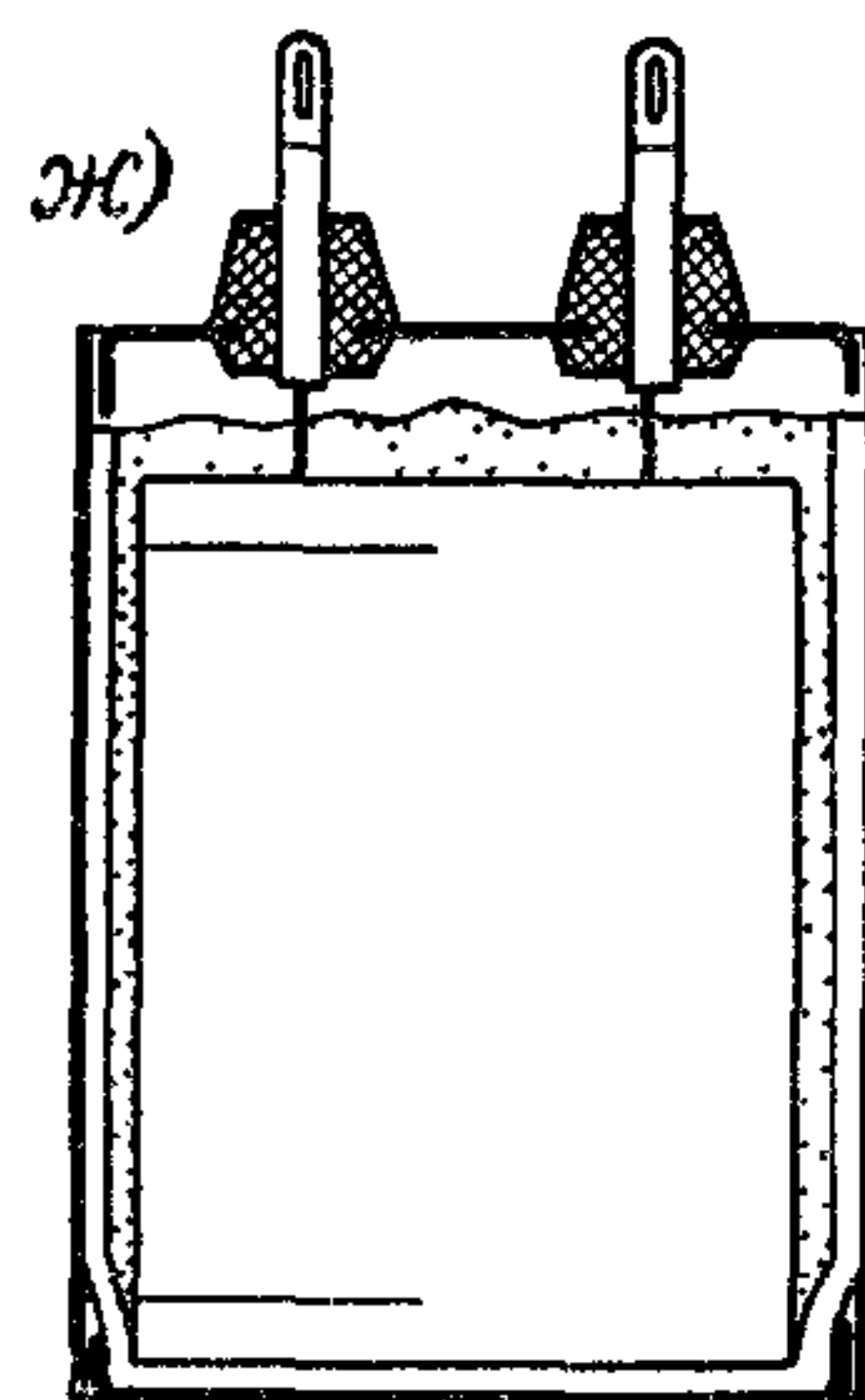
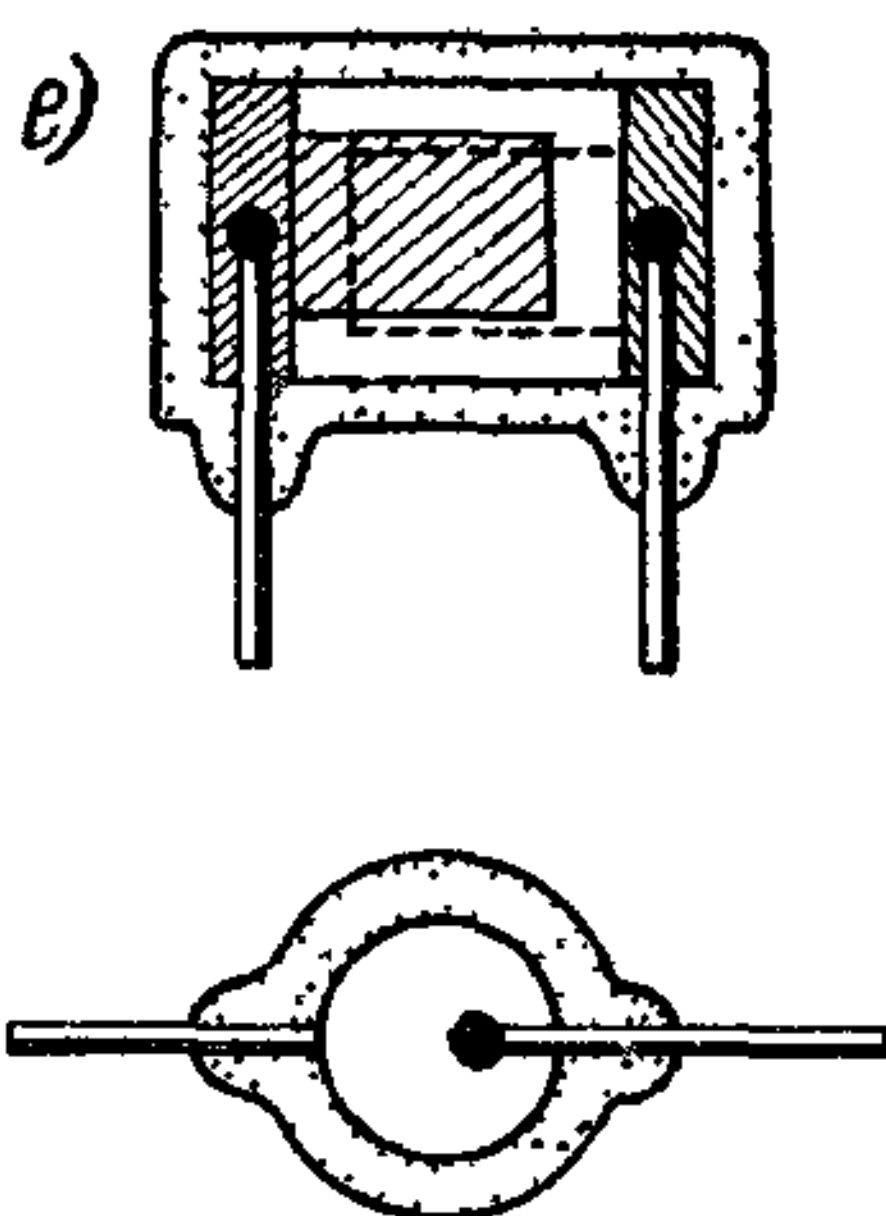
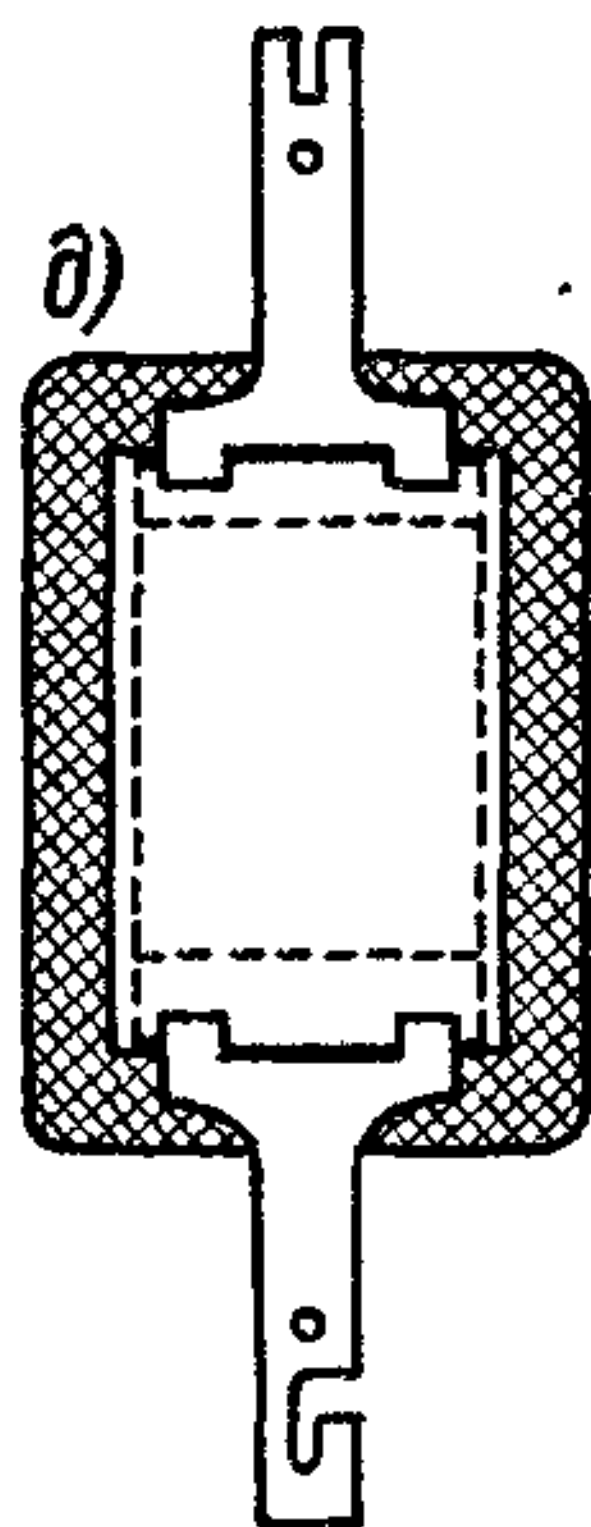
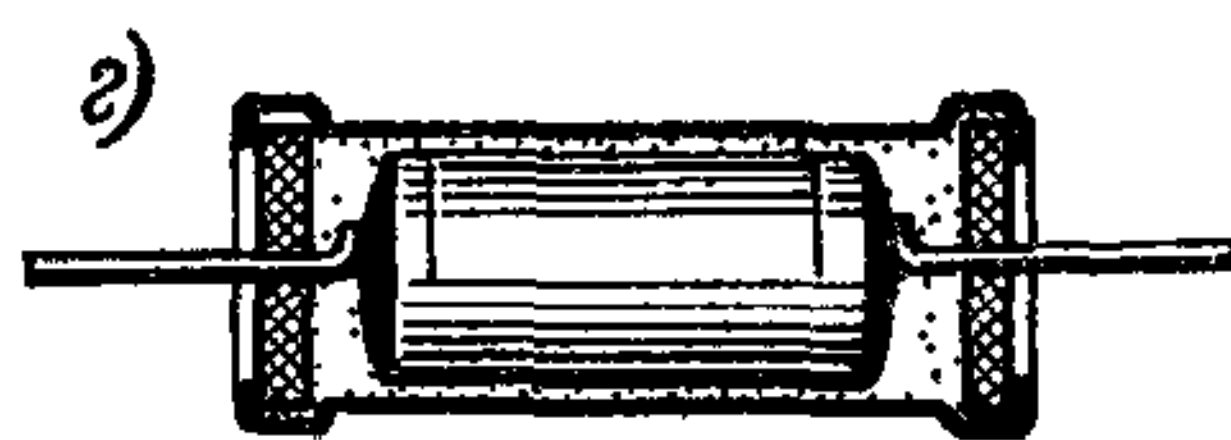
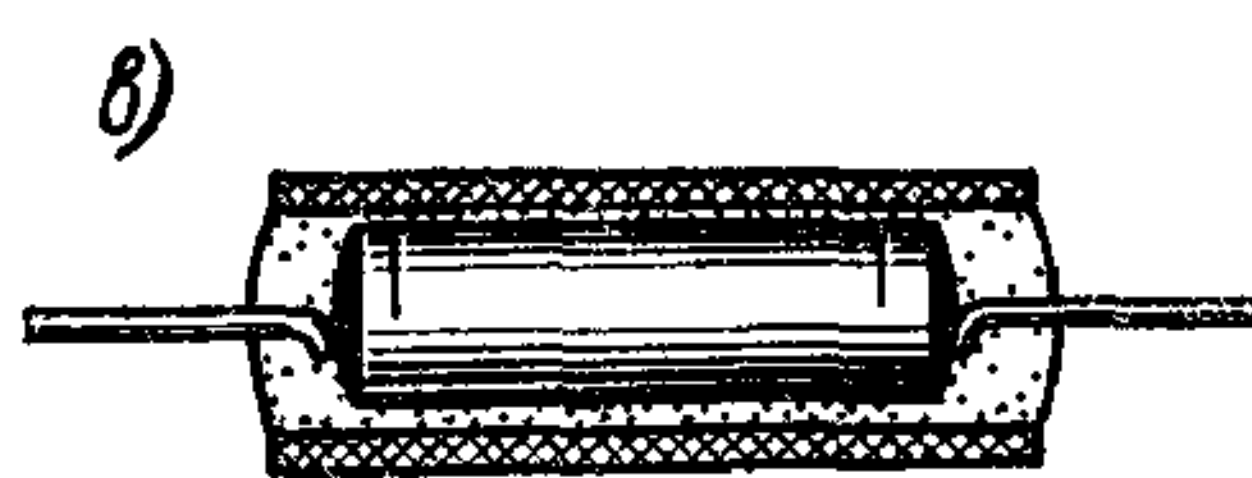
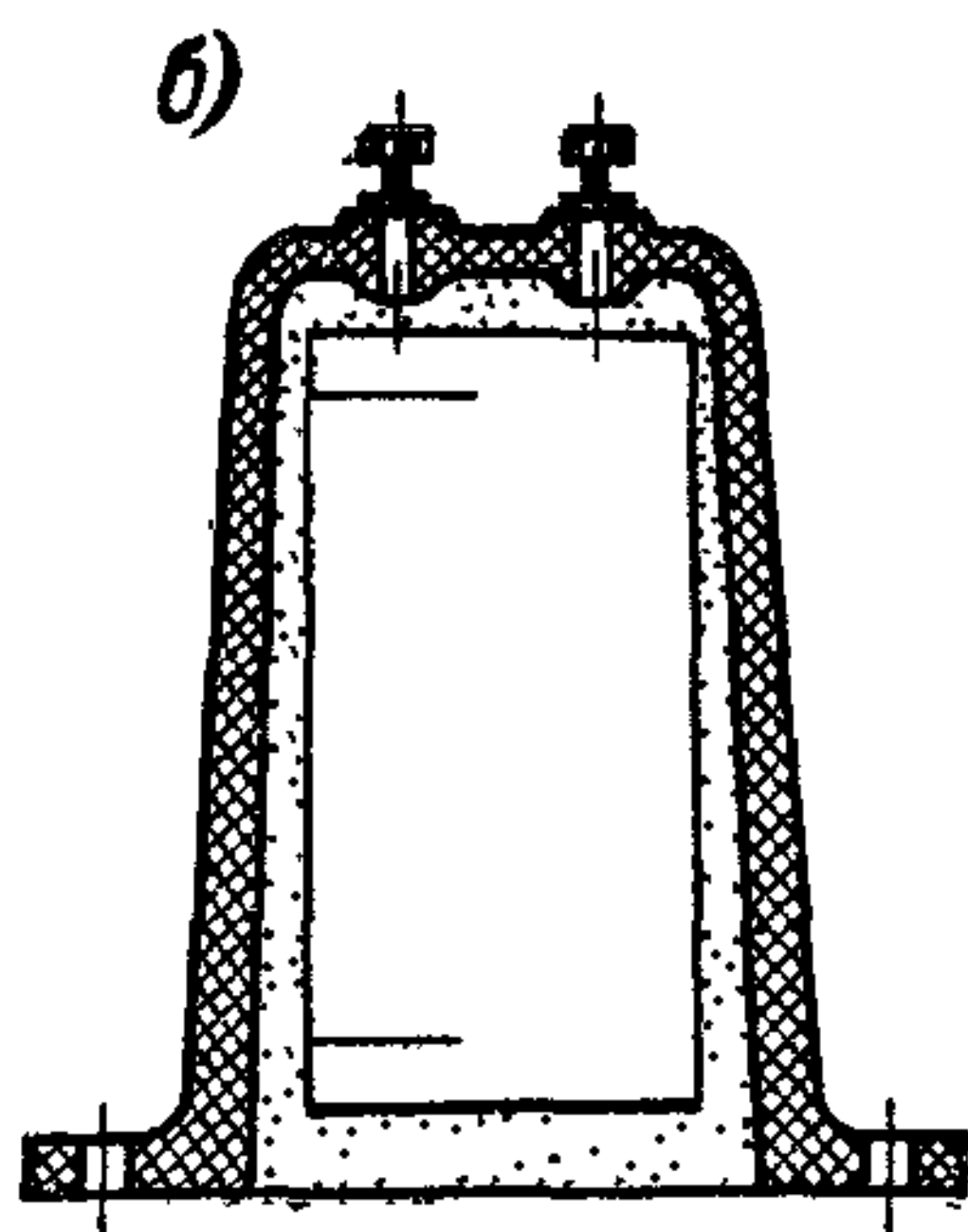
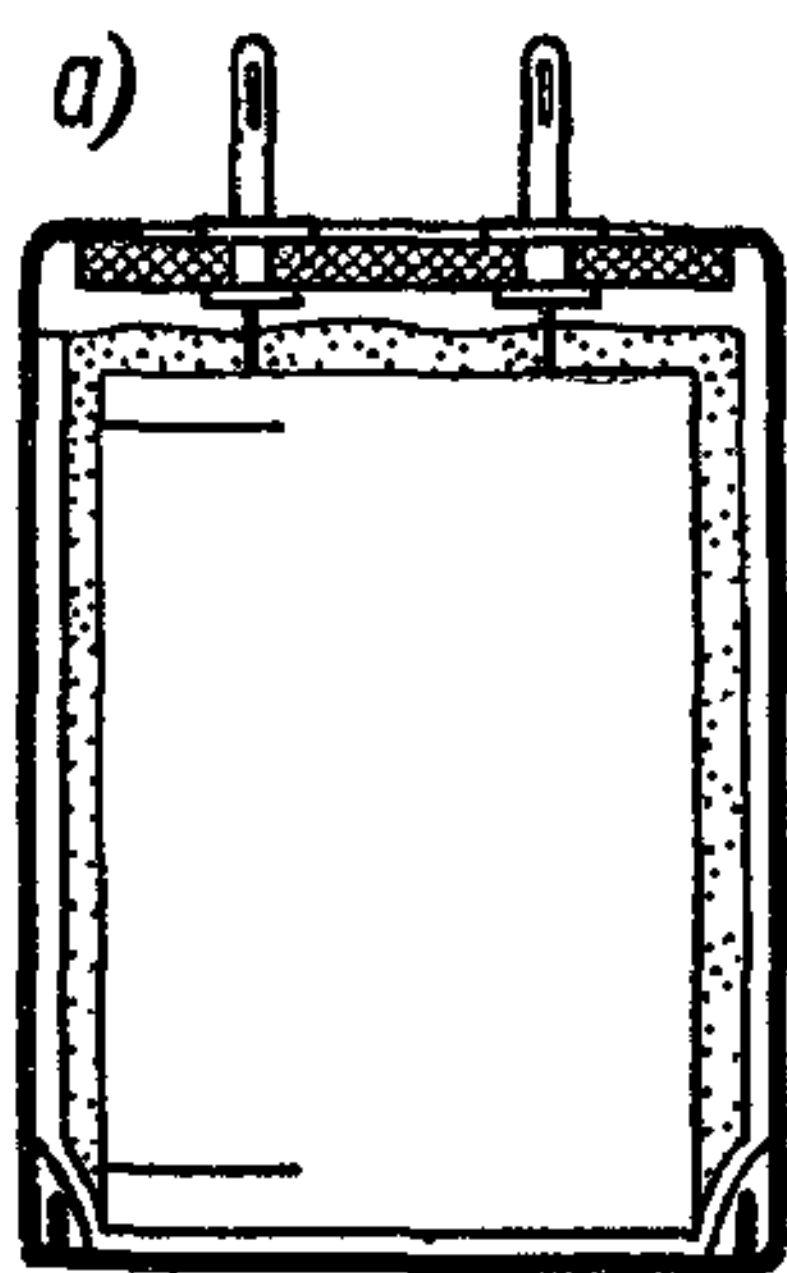


Рис. 118. Зависимость сопротивления изоляции бумажных конденсаторов от времени хранения при нормальной (а) и при высокой (б) относительной влажности.

1 — непропитанная секция; 2 — пропитанная секция; 3 — секция в открытом металлическом корпусе, залитая битумом; 4 — секция в запаянном металлическом корпусе с выводными изоляторами из пластмассы.

тый с одного или с двух торцов (рис. 119, а—г). Такая конструкция обычно обеспечивала длительную работу конденсатора в условиях комнатной влажности и достаточно длительную при повышенной влажности, но при высокой влажности оказывалась недостаточно удовлетворительной (кривые 3 на рис. 118). Металлический корпус давал более высокую надежность, чем корпус из пластмассы или, тем более, из картона.

Недостатком таких конструкций является их пониженная морозостойкость, так как при низких температурах возможно растрескивание заливочного компаунда с последующей потерей влагостойкости конденсатора. Часто для конденсаторов этого типа указывался нижний предел рабочей температуры, равный -10°C , а иногда даже 0°C . Резкое улучшение надежности этой системы влагозащиты удалось получить при использовании для заливки новых типов компаундов на основе эпоксидных смол.



Для слюдяных конденсаторов широко применяется опрессовка пластмассой, обычно типа фенопласт, т. е. терморезистивной. Для бумажных конденсаторов этот метод влагозащиты применялся редко, так как необходимость использовать относительно высокую температуру запрессовки и большое удельное давление вызывает законное опасение за целостность конденсаторной секции. Слюдяные опрессованные конденсаторы могут использоваться при низких температурах (до -60°C) и достаточно надежны при относительной влажности воздуха до 80%. При высокой влажности, до 100%, особенно при одновременном воздействии повышенной температуры (тропическая влажность), для этого типа конденсатора длительную работу или хранение гарантировать все же нельзя. Для опрессовки бумажных конденсаторов фирма «Тесла» (ЧССР) применила термопластичную массу на основе анилиновой смолы, однако эти конденсаторы рассчитаны на облегченные климатические условия работы и по системе МЭК относятся к категории: 10/055/04, т. е. рассчитаны на работу в пределах температуры от -10 до $+55^{\circ}\text{C}$ и должны выдерживать испытание на действие высокой влажности только в течение 4 суток (степень жесткости VII, см. § 41). Некоторые зарубежные фирмы, например «Икар» (Италия), начали применять для опрессовки цилиндрических бумажных и пленочных конденсаторов новую термопластичную массу — полипропилен.

В настоящее время получает широкое применение для влагозащиты разнообразных типов конденсаторов (слюдяных, керамических, бумажных, пленочных) метод облицовки влагонепроницаемым компаундом («окукливание») (рис. 119, е). Облицовку можно производить погружением конденсаторной секции в расплавленный компаунд или путем заливки компаундом в разборной формочке. В СССР этот метод влагозащиты был опробован еще до Отечественной войны, причем использовались специальные компаунды, например, на основе сплава хлорнафталина с высокомолекулярными соединениями: бензилцеллюлозой, полистиролом и т. п. или на основе нефтяного битума с минеральными наполнителями. Оказалось, что при использовании компаундов

Рис. 119. Уплотненные конструкции с применением органических влагозащитных веществ: а — металлический открытый корпус, изоляционная крышка, заливка; б — открытый пластмассовый корпус, заливка; в — изоляционная трубка, заливка; г — металлическая трубка, заливка, изоляционные шайбы; д — опрессовка пластмассой; е — окукливание компаундом; ж — металлический запаянный корпус, выводные пластмассовые изоляторы; з — корпус из термопластичной пластмассы с приваренной пластмассовой крышкой; и — уплотнение вывода эластичной втулкой, сжатой с помощью заклепки; к — сплошной керамический изолятор, уплотненный специальной резиной; л — составной керамический изолятор с резиновым уплотнением; м — изолятор из политетрафторэтилена, сжатый фигурной заклепкой, уплотненный бутиловой резиной; н — изоляционная уплотняющая крышка из обрезиненного гетинакса.

подобных типов влагостойкость облицованных конденсаторов была хуже, чем у конденсаторов, опрессованных пластмассой. Поэтому длительное время метод облицовки у нас не применялся. Теперь к этому методу возник интерес в связи с разработкой облицовочных компаундов новых типов на основе **э п о к с и д н ы х с м о л и п о л и э ф и р о в**, обладающих хорошей адгезией к металлу, достаточной механической прочностью и повышенной влагостойкостью.

Проведенное в США сравнительное испытание слюдяных конденсаторов, облицованных компаундом и опрессованных пластмассой, показало, что последние обладают значительно меньшей надежностью и дают повышенное значение интенсивности отказов. Преимущество облицованных («окукленных») конденсаторов объясняется тем, что при их изготовлении не требуется применения высоких удельных давлений, как при опрессовке, которые могут вызывать механические повреждения диэлектрика, приводящие к отказам конденсатора при длительном испытании под напряжением.

Новым методом нанесения облицовочного компаунда, особенно удобным при массовом производстве, является **м е т о д к и п я щ е г о с л о я**, при котором нагретый конденсатор вносится в камеру, в которой находится во взвешенном состоянии (с помощью струи сжатого воздуха) измельченный в порошок компаунд. Частицы компаунда, оседая на нагретой поверхности конденсаторной секции, оплавляются и создают ровный плотный влагозащитный слой. Этот метод иначе называют методом вихревого напыления. При соответствующем выборе состава влагозащитного компаунда и метода его нанесения на конденсатор можно получить достаточно высокую влагостойкость, обеспечивающую длительную работу при повышенной влажности и относительно продолжительное использование даже в условиях тропической влажности (например, для керамических конденсаторов).

Одним из вариантов использования термореактивных пластмасс в конструкции конденсаторов является **о п р е с с о в к а п л а с т м а с с о й в ы в о д н ы х к о н т а к т о в** в металлической крышке конденсатора (рис. 119, ж), которая затем вплавляется в металлический корпус. Бумажные конденсаторы такой конструкции (тип МКВ) считались в довоенный период наиболее влагостойкими; однако практика их использования в аппаратуре, работающей в полевых условиях, показала, что они выходят из строя вследствие отсыревания менее чем за год. Это подтвердили и длительные испытания в лабораторных условиях (кривые 4 на рис. 118); отдельные образцы давали и худшие результаты — после 300 дней сопротивление изоляции падало до 10—100 *Мом*).

Одним из вариантов использования термопластичных пластмасс для влагозащиты ряда типов конденсаторов, например электролитических, является применение пластмассы на основе **п о л и у р е т а н а** или близких к нему соединений для изготов-

ления корпусов и крышек методом литья под давлением, причем в крышку запрессовываются выводы. Секция конденсатора помещается в корпус, ее выводные проводники припаиваются к выводам крышки, после чего крышка вставляется в корпус и «сваривается» с ним; для этой цели удобно применять нагрев пластмассы в местах соединения крышки с корпусом током высокой частоты.

Преимуществом пластмасс этого типа перед обычным фенопластом является повышенная механическая прочность, устраняющая опасность появления трещин в местах запрессовки вывода в пластмассу, обусловленных механическими напряжениями, возникающими в этих местах при охлаждении после запрессовки. Эти напряжения связаны с тем, что коэффициент расширения пластмассы выше, чем у металла, а потому, охлаждаясь, она сильно сжимает вывод. При использовании пластмассы типа фенопласт появление трещин делает участок возле вывода слабым местом в системе влагозащиты; этот недостаток можно ослабить, применяя небольшие выступы пластмассы в местах запрессовки выводов. Корпуса из термопластичных пластмасс типа полиуретан улучшают надежность влагозащиты по сравнению с обычной пластмассовой опрессовкой, но все же не могут обеспечить вполне надежной длительной работы при влажности 100%, особенно при повышенной температуре. Кроме того, внедрение материалов этого типа задерживается их повышенной стоимостью.

Ряд зарубежных фирм применяет видоизмененные конструкции варианта рис. 119, ж, в которых вместо изоляции выводов от крышки конденсатора с помощью опрессовки их пластмассой используется заливка вывода эпоксидным компаундом с минеральным наполнителем или применение эластичной изоляционной втулки из полисилоксановой (кремний-органической) резины, плотно прижимаемой к крышке или к горловине корпуса с помощью специальной заклепки (рис. 119, и). В ряде случаев применяются также керамические изоляторы сплошные (рис. 119, к) или составные (рис. 119, л), уплотняемые эластичными прокладками из полисилоксановой, нитрилакриловой или другой специальной резины.

Полисилоксановая резина уступает нитрилакриловой, обладая более высокой влагопроницаемостью (табл. 9) и большей набухаемостью в пропиточных жидкостях; ее преимуществом является более высокая нагревостойкость (до 200—250° С вместо 100° С для нитрилакриловой).

Резиновое уплотнение применяется также в комбинации с изоляторами из политетрафторэтилена (ПТФЭ) (рис. 119, м); за рубежом находит также применение обрезиненный гетинакс, представляющий собой листовой слоистый пластик, на который наклеен слой резины. Из такого материала вырубается изоляционные крышки для цилиндрических металлических корпусов, которые уплотняются закаткой краев корпуса (рис. 119, н).

Таблица 9

Константы некоторых органических диэлектриков, характеризующие их влагопроницаемость (данные получены при влажности 90% и 20° С)

Название материалов	$P \times 10^{10},$ г/см · ч · мм	$h \times 10^5,$ г/см ³ · мм	$D \times 10^5,$ см ² /ч
Политрифторхлорэтилен (фторопласт-3)	0,6	1	0,6
Политетрафторэтилен (фторопласт-4) . .	4,5	1,5	3
Парафин	4—6	—	—
Церезин	6	—	—
Полиамид-68	21	7	3
Пластмасса К211-34	25	25	1
Пластмасса К114-35	30	20	1,5
Полиэтилен	30	15	2
Полиуретан	50	50	1
Эпоксидная смола	50—80	10	5—8
Полихлорвинил	33—110	55	0,6—2
Пластмасса ФКП-М	100	35—60	1,5—3
Полистирол	100—200	2	50—100
Битумные компаунды	100—200	—	—
Поликапролактан	150—400	50—200	2—3
Полисилоксановая (кремнийорганиче- ская) пластмасса	200—400	30—60	6—7
Полиметилметакрилат	360	12	30
Полиэтилентерефталат (лавсан)	400	80	5
Бакелит	500	—	—
Нитрилакриловая резина	400—600	100—120	4—5
Бензилцеллюлоза	800—1600	—	—
Ацетилцеллюлоза	1000—1600	—	—
Полисилоксановая (кремнийорганиче- ская) резина	2400	80	30

Все эти конструкции также не могут обеспечить достаточно надежной длительной работы в условиях высокой, особенно тропической влажности. Это обусловлено тем, что и в этих конструкциях используется органическая изоляция, хотя и в относительно небольших количествах.

Недостатком применения органических материалов для целей влагозащиты является присущая всем этим материалам вла г о п р о н и ц а е м о с т ь. Даже когда не нарушена сплошность влагозащитного слоя (отсутствуют трещины или иные повреждения), органический материал все равно будет постепенно пропускать через себя влагу.

Количество воды, проходящее за время τ сквозь слой органического вещества толщиной d и поверхностью S , при разности давлений водяных паров между обеими сторонами слоя $p_2 - p_1 = \Delta p$ (рис. 120), можно подсчитать по формуле

$$Q_v = P \frac{\tau S \Delta p}{d}, \quad (173)$$

где Q_v — количество воды в граммах, τ — в часах, S — в см²,

d — в см, Δp — в мм рт. ст. и P — коэффициент влагопроницаемости органического вещества в г/см · ч · мм.

Величина P равна произведению растворимости h (воды в данном органическом веществе) на коэффициент диффузии D :

$$P = hD, \quad (174)$$

где h — в г/см³ · мм и D — в см²/ч. Значения этих констант для некоторых органических материалов, часто применяемых для влагозащиты конденсаторов и других изоляционных конструкций, приведены в табл. 9.

Если в слое органического вещества, использованного для влагозащиты конденсатора, отсутствуют нарушения сплошности, то можно определить расчетным путем время эффективной влагозащиты, т. е. то время, в течение которого конденсатор может пребыть в заданных условиях влажности без существенного ухудшения его электрических свойств.¹

Если диэлектрик конденсатора поглощает влагу (например, бумажный конденсатор), то для подсчета времени эффективной влагозащиты τ_v можно пользоваться формулой

$$\tau_v = \frac{Vhd}{SP} \ln \left(\frac{p_0}{p_0 - p_{кр}} \right) + \frac{d^2}{D} [\text{ч}]. \quad (175)$$

Здесь V — объем диэлектрика конденсатора в см³, P — коэффициент влагопроницаемости защитной оболочки в г/см · ч · мм, h — растворимость воды в диэлектрике конденсатора в г/см · мм (для бумаги $h \approx 0,003$ — $0,004$ г/см³ · мм), d — толщина защитной оболочки в см, S — поверхность защитной оболочки в см², p_0 — давление водяных паров в окружающей среде в мм рт. ст., $p_{кр}$ — критическое давление водяных паров в мм рт. ст., при котором наступает недопустимое ухудшение электрических свойств конденсатора, D — коэффициент диффузии материала защитной оболочки в см²/ч.

Если диэлектрик конденсатора не поглощает, но адсорбирует влагу (например, слюда или керамика), то надо пользоваться другой формулой:

$$\tau_v = \frac{4d^2}{\pi^2 D} \ln \left[\frac{\pi^2}{8} \left(\frac{p_0}{p_0 - p_{кр}} \right) \right] [\text{ч}]; \quad (176)$$

все обозначения, как в формуле (175).

Обычно представляет интерес время влагозащиты τ_v при длительном использовании конденсатора при влажности 100%. В этом

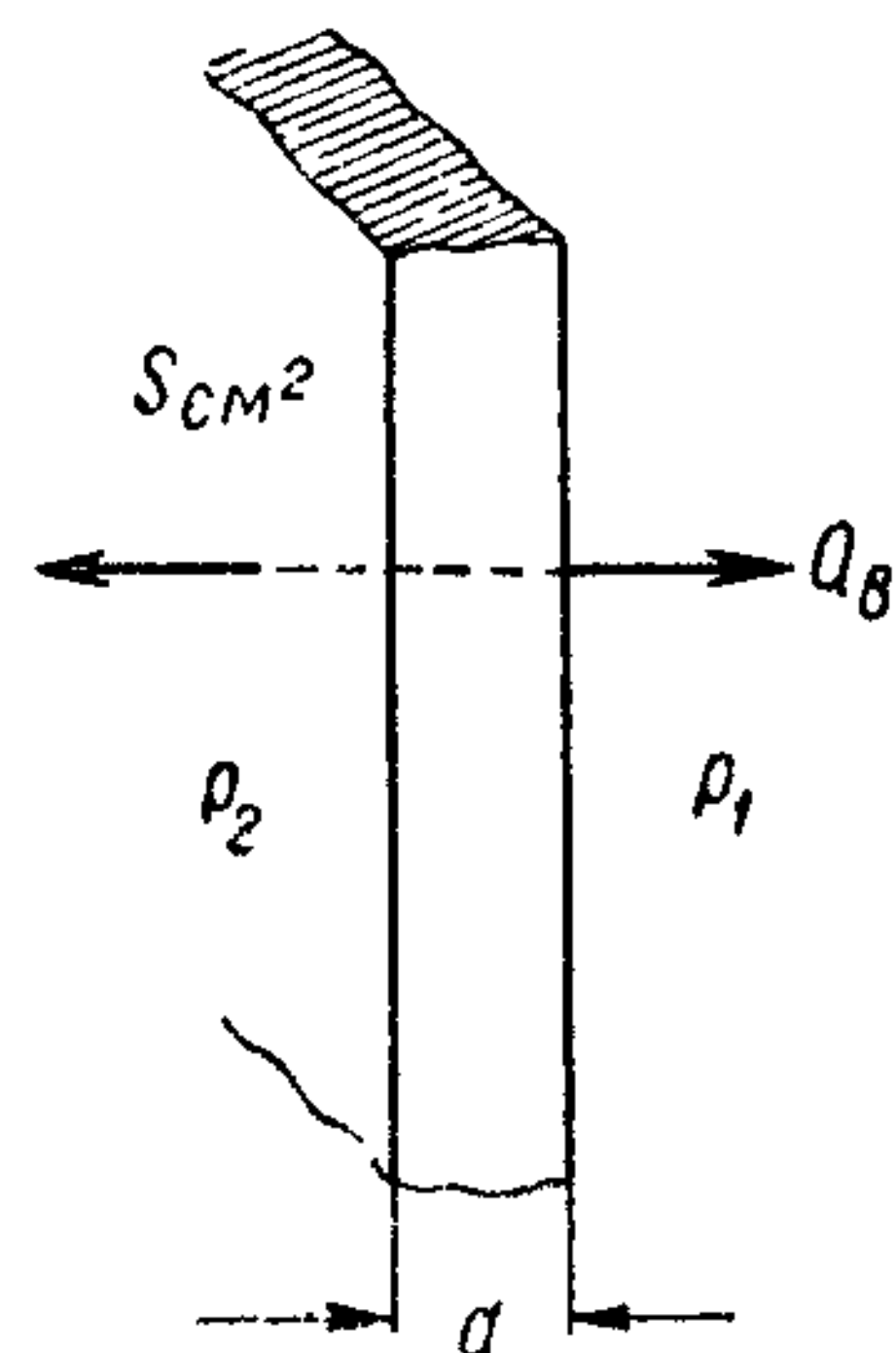


Рис. 120. Схема к расчету влагопроницаемости органической влагозащитной оболочки.

¹ М. М. Михайлов. Влагопроницаемость органических диэлектриков. ГЭИ, 1960.

случае в формулах (175) и (176) стоящее в скобках отношение можно заменить более удобным для вычисления:

$$\frac{P_0}{P_0 - P_{кр}} = \frac{1}{1 - \varphi_{кр}}, \quad (177)$$

где $\varphi_{кр}$ — критическое значение относительной влажности воздуха, вызывающее недопустимое ухудшение характеристик конденсатора.

При подсчетах по формуле (175) для бумажного конденсатора можно полагать $\varphi_{кр} = 0,3$, а при подсчетах по формуле (176) для слюдяного конденсатора $\varphi_{кр} = 0,7$.

Использование формул (175) и (176) позволяет делать предварительный расчет толщины защитного покрытия при разработке конденсаторов с влагозащитой органическими материалами, предназначенных для работы при высокой влажности в течение ограниченного периода времени. При расчетах надо иметь в виду, что численные значения констант P , h и D , указанные в табл. 9, получены при температуре 20°C . При повышении температуры они могут изменяться в сторону увеличения, что приведет к сокращению τ_b в условиях повышенной температуры и высокой влажности по сравнению с его значениями, полученными расчетом по формулам (175) и (176), с использованием данных табл. 9.

Увеличение влагопроницаемости органических веществ с повышением температуры делает влагозащиту, основанную на применении органических веществ (хотя она и привлекательна вследствие ее простоты и технологичности) особенно ненадежной в случае конденсаторов, предназначенных для работы в тропиках, когда имеет место воздействие высокой влажности окружающей среды при повышенной температуре. Применение многих видов органической изоляции в тропических условиях нежелательно также и потому, что она мало устойчива к воздействию плесени (грибков), а также разрушается насекомыми, особенно термитами.

Органические вещества в условиях повышенной влажности и температуры, характерных для тропиков, могут служить питательной средой для развития на их поверхности колоний грибков (*fungus*). Это приводит к возможности отказов в связи с резким возрастанием поверхностной утечки. Развитие грибков может вызвать также коррозию металлов и разложение изоляции.¹ Для повышения грибоустойчивости изоляции было предложено покрывать ее антигрибковыми лаками, содержащими токсичные для грибков вещества (фунгисиды). Для проверки грибоустойчивости элементов электронной техники, в том числе и конденсаторов, рекомендации МЭК предусматривают испытание в течение 28 суток в камере с относительной влажностью 95—100% и температу-

¹ А. В. Астафьев. Окружающая среда и надежность радиотехнической аппаратуры. «Энергия», 1965.

рой 28—30° С, без циркуляции воздуха, в которой помещены стеклянные или фарфоровые чашки с питательным раствором, содержащим следующие культуры грибов: *Aspergillus niger*, *Aspergillus amstelodami*, *Paecilomyces varioti*, *Stachybotrys atra*, *Penicillium brevicompactum*, *Penicillium cyclopium* и *Chaetomium globosum*.

Питательный раствор имеет состав: 2 г NaNO_3 , 1 г K_2HPO_4 , 0,5 г $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0,5 г KCl , 0,01 г $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 30 г глюкозы и 1 л дистиллированной воды.

После истечения срока испытания изделия извлекают из камеры и осматривают невооруженным глазом для обнаружения появления грибов.

Б. Влагозащита с применением неорганической изоляции и металла. (Герметизированные конструкции). Недостатки влагозащиты, основанной на применении органических материалов, обладающих конечной величиной влагопроницаемости, привели к разработке влагозащитных конструкций, не содержащих органической изоляции. Широкое распространение получили герметизированные конструкции, представляющие собой сочетание металла с керамикой или стеклом, с применением швов, соединяемых пайкой мягкими припоями (Sn—Pb); эта система влагозащиты известна под названием **вакуумплотной герметизации** (рис. 121).

Для конденсаторов большой емкости применяются металлические корпуса (обычно стальные) с припаянными к ним крышками, в которые впаиваются керамические металлизированные изоляторы (рис. 121, а) или специальные стеклянные проходные изоляторы («слезки») (рис. 121, б). Металлизация керамических изоляторов производится методом вжигания (§ 22) с применением серебра (реже платины или железа) для создания на поверхности керамики, в местах пайки, металлического слоя. По слою серебра проводят горячее лужение; иногда, особенно в случае изоляторов большого размера, перед лужением

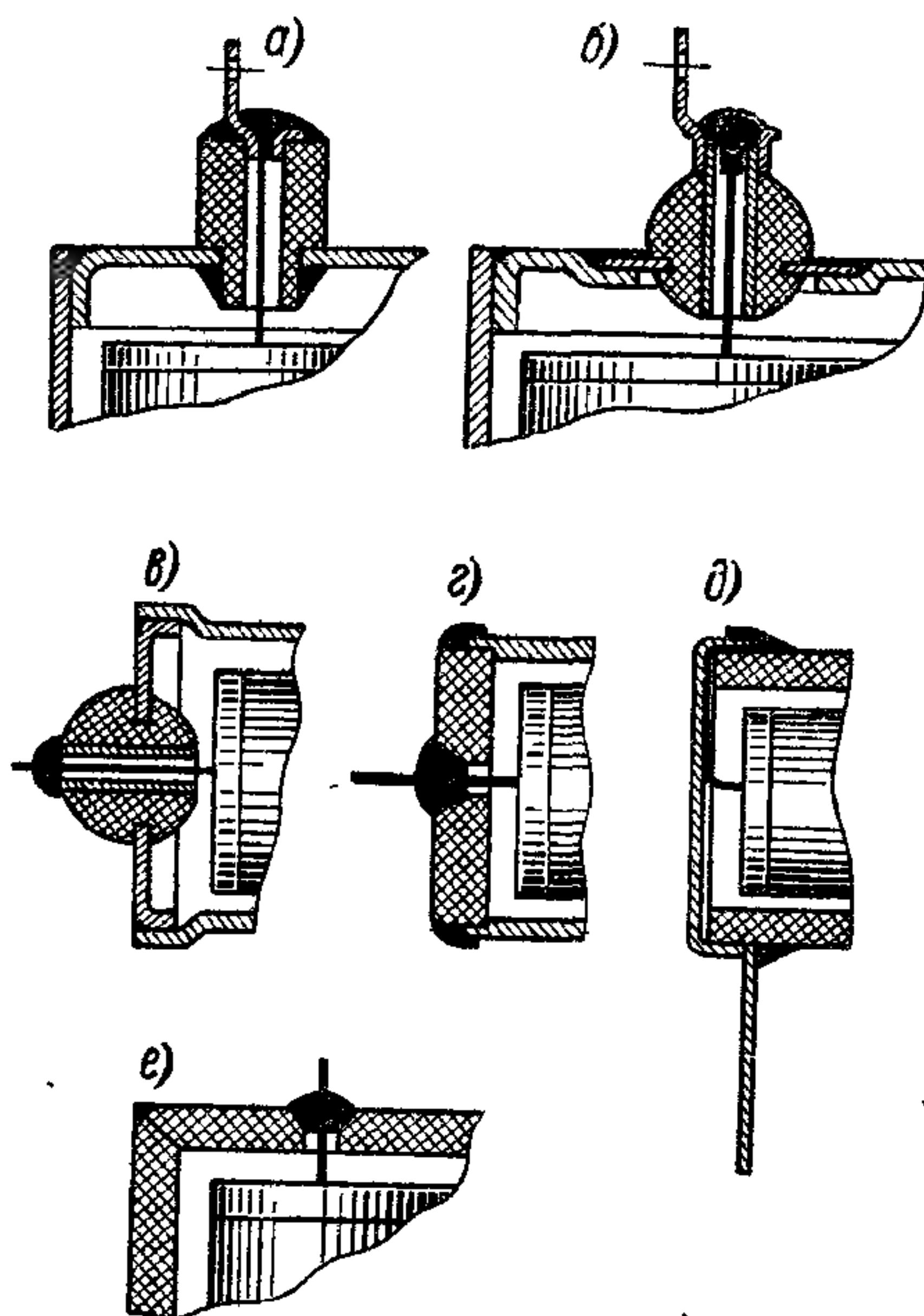


Рис. 121. Вакуумплотная герметизация: а — керамический изолятор, впаянный в металлическую крышку; б — стеклянный изолятор, впаянный в крышку; в — стеклянный изолятор, впаянный в металлическую трубку; г — керамический дисковый изолятор, впаянный в металлическую трубку; д — металлический колпачок, припаянный к керамической трубке и закрывающий ее с торца; е — керамическая крышка, припаянная к керамическому корпусу; выводы пропущены через отверстия к крышке и впаяны в нее.

серебряный слой усиливается нанесением на него гальваническим путем слоя меди.

Стекланный проходной изолятор, представляющий собой металлическую трубочку и шайбу, заваренные в стекло, дешевле керамического и удобнее технологически, так как при впаивании его в крышку приходится спаивать с ней край металлической шайбы, а не тонкий металлизированный слой, как в случае керамического изолятора, когда при неосторожной пайке целостность слоя может быть нарушена. Недостатком стекланных изоляторов при

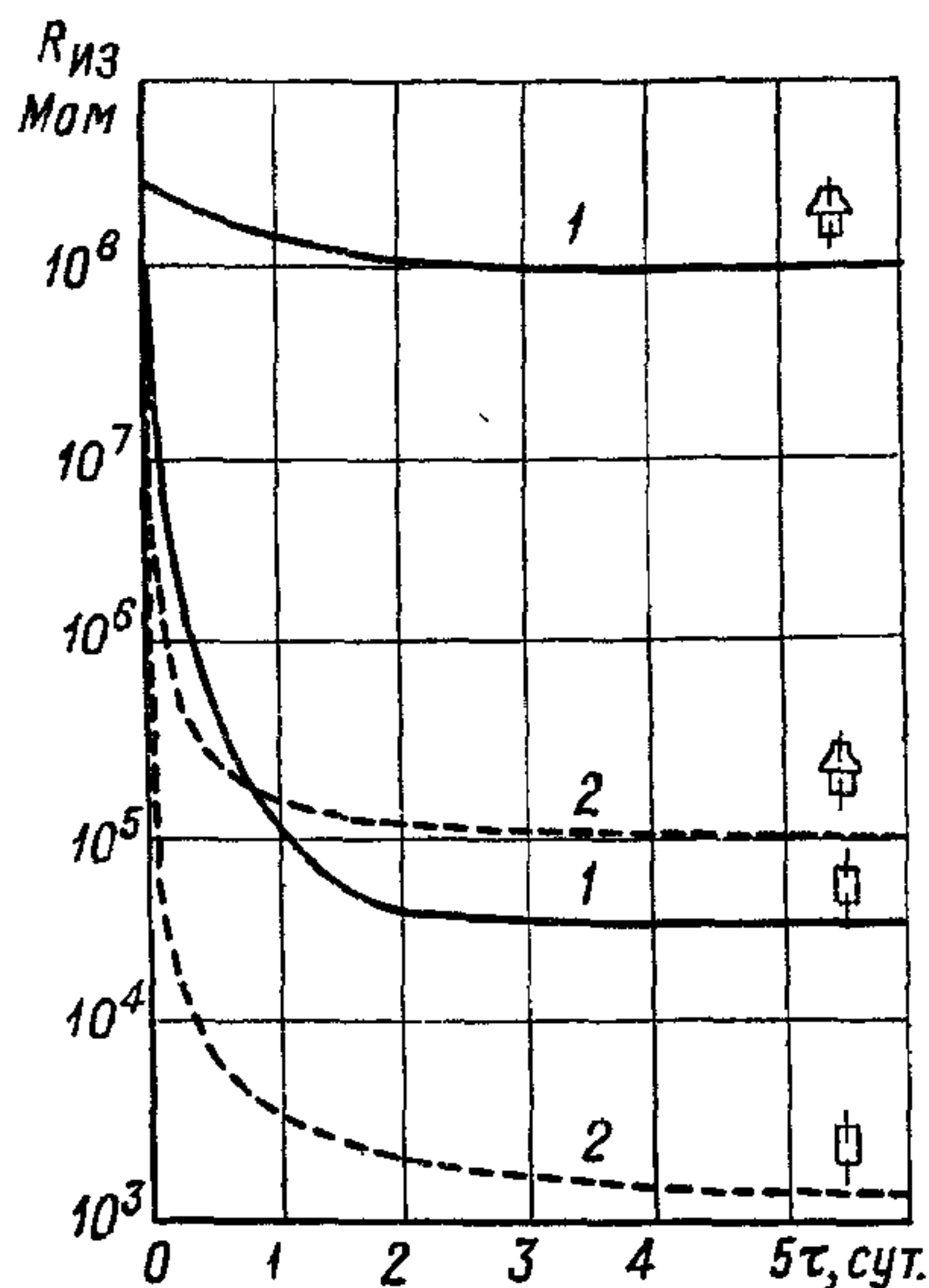


Рис. 122. Зависимость сопротивления изоляции керамических (1) и стекланных (2) изоляторов от времени выдержки в условиях влажности 98% (изоляторы как с защитной юбкой, так и гладкие).

их использовании для герметизации высокочастотных конденсаторов служит то, что применяемая в них металлическая арматура (трубочки, шайбы) изготавливается из магнитного ферро-никелевого сплава, коэффициент расширения которого близок к коэффициенту расширения стекла. Это может приводить к заметному увеличению индуктивности конденсатора. Недостатком стекланных изоляторов по сравнению с керамическими является также повышенная утечка по поверхности стекла, особенно при высокой влажности (рис. 122). При повышенных температурах и постоянном напряжении наблюдались случаи разрушения стекланных изоляторов за счет электрохимического старения стекла. Кроме того, у нас стекланные проходные изоляторы выпускаются только до рабочего напряжения не выше 2 кВ, так что при более высоких напряжениях можно использовать только керамические изоляторы. Некоторые американские фирмы применяют стекланные изоляторы и при изготовлении конденсаторов высокого напряжения (рис. 124, в, ниже). Успешный опыт изготовления в СССР линейных изоляторов высокого напряжения из закаленного стекла повышенной прочности позволяет надеяться на получение высоковольтных стекланных изоляторов и для конденсаторного производства.

Для механизации трудоемких операций по впаиванию изоляторов в крышки корпусов (а также по припайке крышек к корпусам) в конденсаторостроении с успехом используется нагреватель высокой частотой. При этом изоляторы с колечками припоя вкладываются в углубления возле отверстий в крышках и двигаются по конвейеру к индукционному контуру высокочастотной

стотного генератора. При прохождении крышки мимо контура быстрый локальный разогрев токами высокой частоты обеспечивает расплавление припоя и впаивание изолятора.

Для конденсаторов малой емкости применяют корпуса в виде металлических трубок, торцы которых закрываются крышками с впаянными в них стеклянными или керамическими изоляторами (рис. 121, в и г). Вместо керамических торцовых изоляторов теперь часто применяют изоляторы из прессованного стекла; иногда применяются керамические трубки с металлизированными краями,

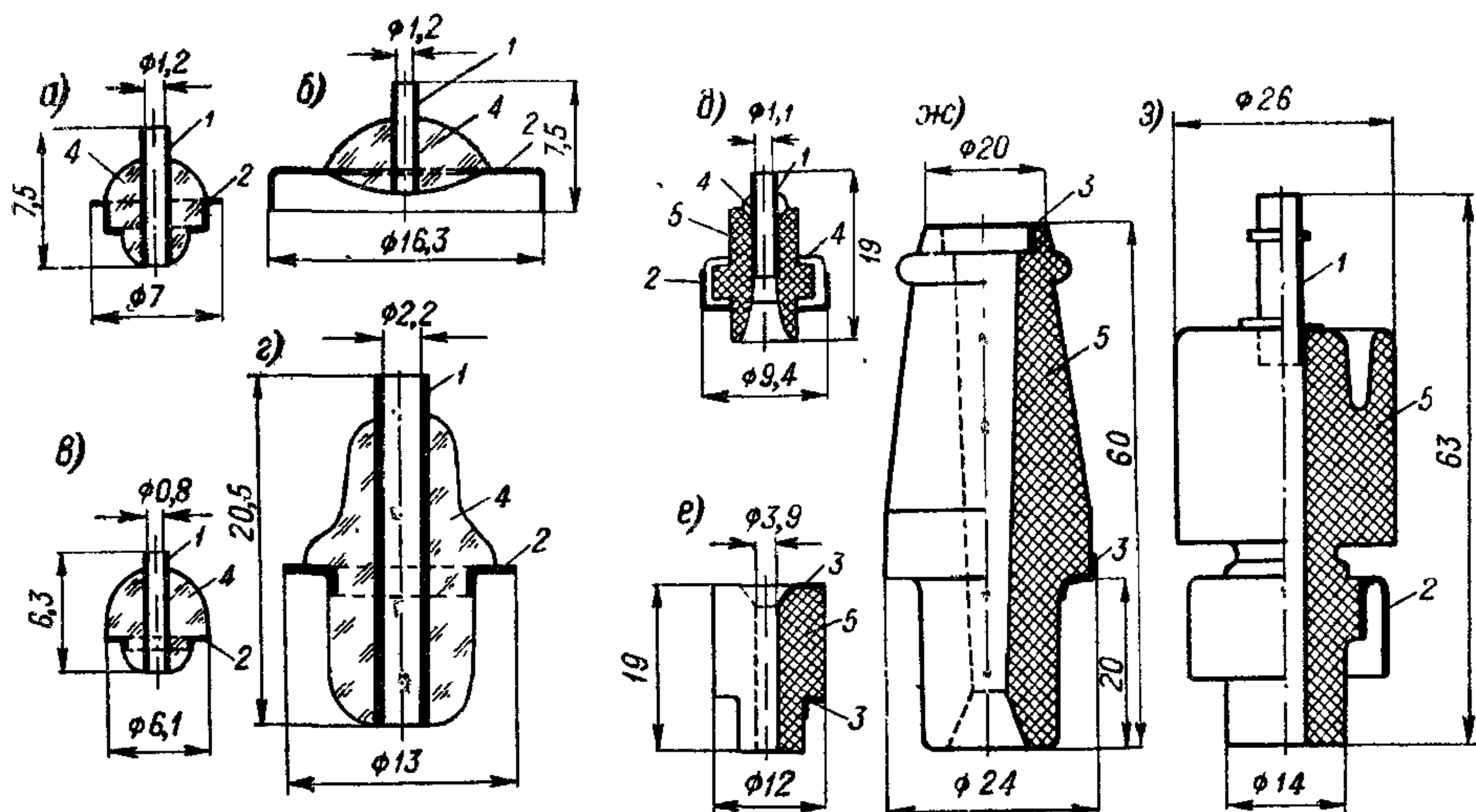


Рис. 123. Выводные изоляторы для герметизированных конденсаторов: а — стеклянный ИСЦ на 600 в; б — стеклянный ИСК на 1000 в; в — стеклянный ИСШ на 250 в; г — стеклянный ИСШ на 2000 в; д — керамический ИКПТ на 2000 в (арматура связана с керамикой через переходный слой стекла); е — керамический ИКП-3 на 3000 в; ж — керамический ИКП-10 на 10 кв; з — керамический ИКПМ на 10 кв (арматура связана с керамикой без переходного слоя стекла).

1 — металлическая трубка; 2 — металлическая шайба; 3 — слой металлизации на керамике; 4 — стекло; 5 — керамика.

к которым припаивают торцовые металлические колпачки с отводами («сковородки») (рис. 121, д). Некоторые фирмы применяют вместо керамических трубочек стеклянные, металлизированные на концах и спаянные с торцовыми колпачками, обычно снабженными выводным болтиком с гайкой. Реже можно встретить герметизированную конструкцию конденсатора, в которой и корпус, и крышка изготовлены из керамики (рис. 121, е).

Сопоставление размеров керамических и стеклянных изоляторов для герметизации конденсаторов, применяемых в радиоэлектронной аппаратуре, для нескольких пределов рабочего напряжения дано на рис. 123. Масштаб для керамических изоляторов уменьшен в 2 раза в сравнении со стеклянными. Предельные рабо-

чие напряжения: для стеклянных изоляторов типа ИСШ — 2 кв, для керамических ИКП — 30 кв, для керамических ИКПТ — 5 кв и для керамических ИКПМ — 50 кв. Эти данные соответствуют постоянному напряжению и относятся к конденсаторам для электронной техники. В силовом конденсаторостроении применяют фарфоровые изоляторы с другими размерами, маркированные рабочим напряжением переменного тока.

Каждый конденсатор, имеющий вакуумплотную герметизацию, должен быть проверен на герметичность, так как в процессе пайки можно ожидать случайных нарушений сплошности паяных швов корпуса, а также нарушения герметичности в местах впайки изоляторов. Конденсаторы небольших размеров погружают в нагретое масло и наблюдают выделение пузырьков воздуха в местах нарушения герметичности. В этих местах дефектные образцы перепаяивают и подвергают вторичному испытанию. Иногда применяют ненагретое масло и создают пониженное давление над его поверхностью.

Для конденсаторов, пропитанных неполярными углеводородными массами (нефтяным маслом, вазелином), проверка герметичности проводится на тщательно вытертых и нагретых конденсаторах, помещаемых в темную камеру и освещаемых ультрафиолетовыми лучами. При этом можно легко заметить небольшие следы пропиточной массы, выступающие в местах нарушения герметичности, по характерной флюоресценции.

Конденсаторы больших размеров проверяют на герметичность, нагревая их в термостате на листах чистой фильтровальной бумаги, позволяющей легко заметить следы масла, проходящие через неплотности пайки. Иногда при проверке конденсаторов на герметичность их предварительно покрывают меловой белой краской, на которой отчетливо заметно выступившее масло.

При использовании герметизированной конструкции корпуса заливка конденсаторных секций в корпусе, применявшаяся ранее как средство влагозащиты, представляется, на первый взгляд, ненужной. Однако, если запайка конденсатора проводилась в комнатных условиях, то воздух, оставшийся в конденсаторе, может содержать некоторое количество влаги. Если такой конденсатор подвергнуть воздействию низкой температуры, то влага может сконденсироваться на поверхности конденсаторной секции и дать резкое снижение сопротивления изоляции. С этой точки зрения, заливка полезна, так как уменьшает свободный объем воздуха, оставшегося в конденсаторе, и защищает поверхность секции от влаги. При заливке твердыми массами улучшается закрепление конденсаторной секции в корпусе и повышается устойчивость конденсатора к тряске и вибрациям. При заливке жидкой массой повышается разрядное напряжение на закраинах и увеличивается напряжение короны у краев обкладок; кроме того, улучшается отвод тепла к стенкам корпуса.

Герметизация конструкции конденсатора описанными здесь

методами обеспечивает весьма длительное сохранение электрических свойств конденсаторов в условиях высокой влажности, но заметно увеличивает его стоимость. Поэтому, если конденсатор предназначен для работы в условиях нормальной влажности или рассчитывается на относительно непродолжительную работу при высокой влажности (например, несколько сотен часов), то для него следует применять более дешевые влагозащитные конструкции, основанные на использовании органической изоляции (см. рис. 119).

На основе использования вакуумплотной герметизации в СССР были разработаны и освоены в массовом производстве герметизированные конденсаторы всех основных типов (серии КСГ, СГМ, КБГ, МБГ, КГК, КЭГ и др.), рассчитанные на длительную работу в условиях влажности до 100% с диапазоном рабочих температур от -60 до $+70^{\circ}\text{C}$. Эти конденсаторы оказались весьма надежными как при длительной работе, так и при хранении и обеспечили резкое повышение качества по сравнению с ранее применявшимися типами конденсаторов, имевшими влагозащиту на основе органических материалов. Однако, когда пришлось повысить верхний предел рабочей температуры, то оказалось, что вакуумплотная герметизация, основанная на использовании мягких припоев, оказывается недостаточно удовлетворительной. Проведенные испытания показали, что при температурах выше $85-100^{\circ}\text{C}$, особенно в условиях тряски и вибраций, наблюдается перерождение структуры припоев, связанное с нарушением плотности паяного шва и с потерей конденсатором герметичности.

При использовании серебряных керамических изоляторов в условиях повышенной температуры наблюдались также случаи растворения серебряного слоя в припое. Нарушения герметичности наблюдались не только в местах впаивания изоляторов, но и в паяных швах корпуса. В связи с этим возникла задача разработки новой системы герметизации, пригодной для работы при повышенных рабочих температурах порядка 100°C и выше.

В основу этой системы герметизации положено применение стальных корпусов, не имеющих шва, изготовляемых методом глубокой вытяжки и соединяемых с крышками методом сварки. Для конденсаторов больших размеров, которые не могут быть получены вытяжкой, применяется сварка швов. Для сварки крышки с корпусом применяется контактная рельефная сварка или дуговая сварка в среде инертного газа (рис. 124, а). Преимуществом первого способа является большая производительность, которую можно получить, используя специальные сварочные установки автоматического действия; однако их стоимость велика, и они потребляют значительные количества электроэнергии; кроме того, при этом способе сварки увеличивается габарит конденсатора, так как приходится делать отбортовку (обычно не менее 3 мм). Второй способ позволяет обойтись без отбортовки, но при нем труднее провести автоматизацию и производительность его ниже.

Особой задачей являлась разработка выводного изолятора для высокотемпературных герметизированных конструкций; такой изолятор должен допускать надежное соединение с крышкой конденсатора, не пропускающее влаги и не требующее соединения мягкими припоями. Одним из

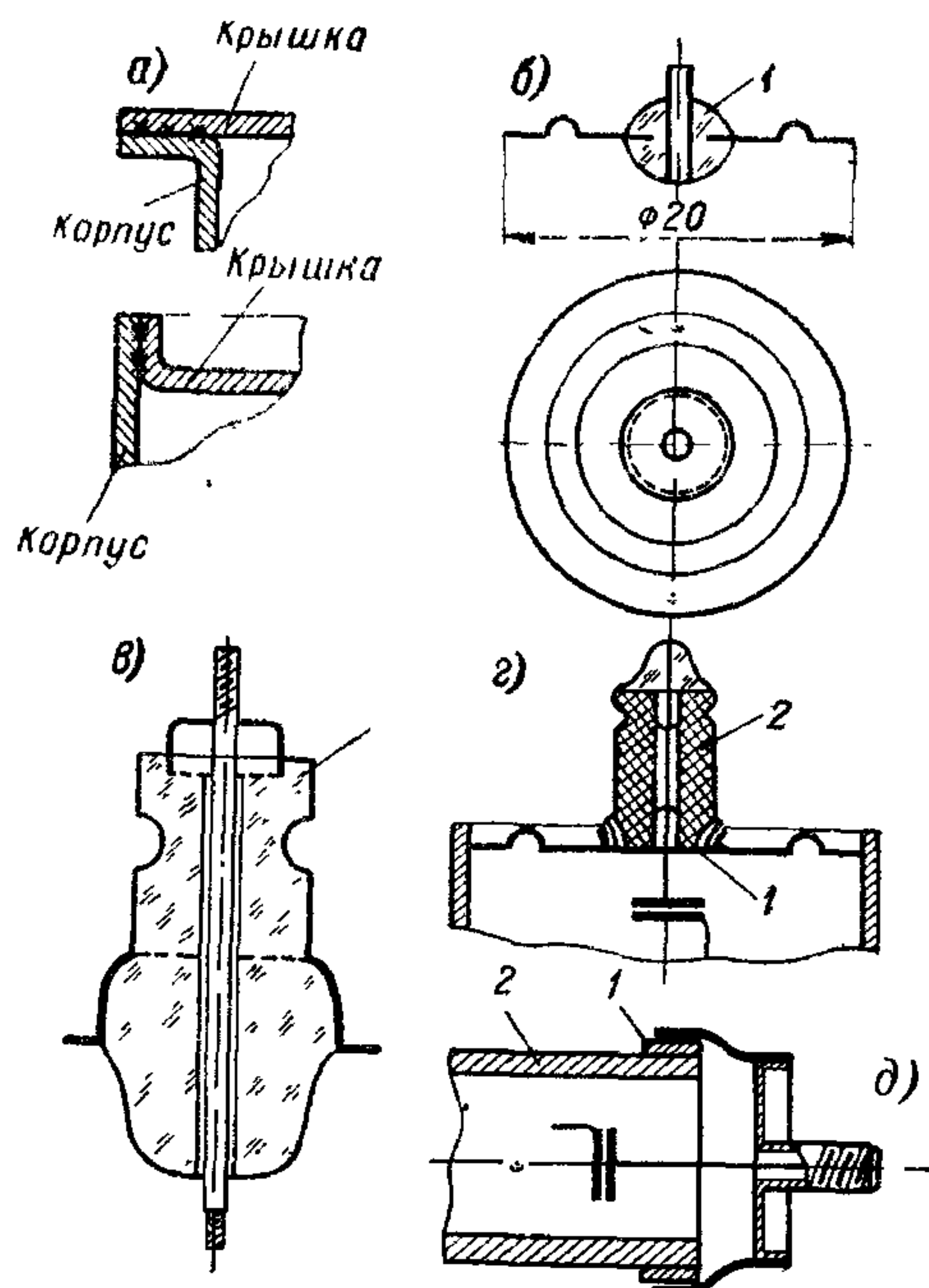


Рис. 124. Система герметизации для нагревостойких конденсаторов: а — методы сварки крышки с корпусом (вверху — рельефный, внизу — дуговой); б — стеклянный низковольтный изолятор, допускающий приварку шайбы к крышке корпуса; в — стеклянный высоковольтный изолятор, допускающий приварку или пайку твердым припоем; г — керамический изолятор, соединенный с крышкой переходным слоем стекла (крышка сварена с корпусом); д — керамическая трубка (корпус) переходным слоем стекла соединена с коваровым кольцом; к кольцу приварена стальная крышка (1 — стекло; 2 — керамика).

вариантов таких изоляторов явился обычный стеклянный проходной изолятор, но с резко увеличенным диаметром металлической шайбы, допускающий приварку к крышке краев этой шайбы без разрушения изолятора от нагрева при сварке (рис. 124, б). Недостатком этой конструкции является возможность развития электролиза в стекле при повышенных температурах и постоянном напряжении, а также уже упоминавшееся выше отсутствие в нашем конденсаторостроении стеклянных изоляторов на напряжение выше 2 кв. Можно надеяться, что удастся получить такие сорта стекол, которые будут более устойчивы к воздействию постоянного поля при сильном нагреве и позволят изготавливать из них изоляторы большого размера для высоких рабочих напряжений, как это практикуется некоторыми зарубежными фирмами (рис. 124, в).

Практическое применение нашла серия керамических изоляторов типа ИКПТ (изолятор керамический проходной теплостойкий) (рис. 123, д), в которых керамическое

тело изолятора соединяется с металлической арматурой с помощью тонких переходных слоев стекла. Арматура (трубочка и боковая шайба или колпачок) изготавливается из сплава ковар (29% Ni, 17% Co и 54% Fe) и приваривается к слою стекла, наваренному на поверхность керамики. Изолятор припаивается к крышке твердым припоем, а выводной проводник, пропущенный через трубку изолятора, соединяется с концом трубки

сваркой, при которой плотно заваривается отверстие трубки. Другой вариант показан на рис. 124, г. Здесь керамический изолятор закреплен с помощью переходного слоя стекла в коваровой крышке, которая соединяется с трубчатым стальным корпусом с помощью дуговой электросварки в среде инертного газа; в сквозное отверстие изолятора пропущена молибденовая проволока, служащая выводом, которая также заварена в керамике стеклом. Отводы от конденсаторной секции соединяются с выводом путем сварки. К другому концу вывода приваривается латунный колпачок или болтик с гайкой.

Для небольших цилиндрических конденсаторов используют также корпуса в виде керамических трубок, на концы которых навариваются стеклянные пояски; к пояскам приваривают коваровые кольца, соединяемые сваркой с торцовыми стальными колпачками; в колпачки вварены трубочки для прохода выводов; после окончания сборки, после пропитки конец трубки заваривается (рис. 124, д).

Другим решением задачи создания изолятора для герметизации конденсаторов при повышенных температурах является замена металлизации серебром на новый способ металлизации керамических изоляторов железом в среде водорода с последующей пайкой полученного слоя железа к металлической арматуре или к крышке с помощью твердых припоев. Вместо железнения может также применяться молибденово-марганцевое покрытие, к которому также можно припаивать коваровую арматуру, используя твердые припои. Один из вариантов изоляторов такого типа (серия ИКПМ), рассчитанный, как и изоляторы серии ИКПТ, на интервал рабочих температур от -60 до $+200^{\circ}\text{C}$, показан на рис. 123, з, выше.

Подобные конструкции обеспечивают высокое качество герметизации и могут надежно работать при температурах до $200-250^{\circ}\text{C}$. Недостатком их является высокая стоимость, обусловленная сложностью изготовления и необходимостью использовать дорогие материалы (ковар, молибден). Поэтому, наряду с ними, для работы при меньших температурах сохраняется и система вакуумплотной герметизации с пайкой мягкими припоями, а для работы при меньшей влажности и система влагозащиты с применением органических материалов.

Следует отметить, что конденсаторы полностью герметизированных конструкций в металлических корпусах с выводными стеклянными или керамическими изоляторами, находясь в условиях высокой влажности, снижают свое сопротивление изоляции, хотя влага не имеет возможности проникнуть внутрь конденсатора. Это снижение обусловлено увеличением тока утечки по поверхности изолятора за счет осаждения на ней влаги и является обратимым, так как после обсыхания поверхности изоляторов поверхностное сопротивление восстанавливается. При этом, как отмечалось выше (рис. 122), керамические изоляторы дают значительно меньшее снижение поверхностного сопротивления в условиях высокой влажности, чем стеклянные, отчего им следует

отдавать предпочтение при изготовлении конденсаторов с высокой постоянной времени (например, с диэлектриком из неполярных синтетических пленок: полистирола, фторопласта и т. п.). Заметное улучшение устойчивости сопротивления изоляции в условиях высокой влажности можно получать, применяя «юбку» на поверхности изолятора; это объясняется ослаблением тангенциальной составляющей напряженности поля в вогнутых участках «юбки».

Сильное увлажнение поверхности стекла в условиях высокой влажности снижает величину разрядного напряжения стеклянных изоляторов. Поэтому в нормах на изоляторы этого типа предусматривается, что в условиях влажности 95—98% испытательное напряжение снижается от $3 U_{\text{ном}}$ до $1,25 U_{\text{ном}}$.

§ 43. Влияние пониженного давления окружающей среды

При использовании конденсаторов в высотном оборудовании приходится учитывать снижение давления воздуха с повышением высоты над уровнем моря. Это снижение характеризуется цифрами, приведенными ниже:

Высота над уровнем моря, км	0	0,5	1	5	10	15	20	40
Давление воздуха, мм рт. ст	760	716	674	405	198,2	90,2	41,0	2,15

Как было указано выше (§ 31), электрическая прочность воздуха снижается при уменьшении давления (см. рис. 69). При этом минимальное значение пробивного напряжения лежит в области произведения pd (давление \times зазор) порядка 3—4 мм · мм рт. ст. Таким образом, при зазорах порядка 0,5—2 мм, характерных для воздушных конденсаторов, вплоть до высот порядка десятков километров можно ожидать непрерывного снижения электрической прочности воздуха, а следовательно, и пробивного напряжения конденсатора. Это обстоятельство привело к замене воздушных конденсаторов в самолетном оборудовании на вакуумные конденсаторы, у которых пробивное напряжение не зависит от давления.

Для других типов конденсаторов снижение давления окружающего воздуха опасно прежде всего потому, что происходит снижение разрядного напряжения по поверхности выводных изоляторов. На рис. 125 показана зависимость разрядного напряжения от длины пути разряда для стеклянного изолятора при двух значениях давления воздуха и зависимость разрядного напряжения от давления для керамического изолятора ИКП-4/1 с длиной разрядного пути порядка 25 мм. Если при нормальном давлении разрядная напряженность поля по поверхности изолятора составляет не менее 1 кВ/мм и при расчете необходимой длины пути разряда можно исходить из допустимого значения порядка 0,5 кВ/мм, то при снижении давления разрядная напряженность резко па-

дает, причем уже при давлении порядка 100 мм рт. ст. (12—13 км над уровнем моря) оказывается затруднительным существенно повысить $U_{\text{разр}}$ даже при значительном увеличении пути разряда (рис. 125). В связи с этим для стеклянных изоляторов при снижении давления воздуха до 5 мм рт. ст. при $U_{\text{ном}} \leq 500$ в и до 40 мм рт. ст. при $U_{\text{ном}} > 500$ в испытательное напряжение снижается от $3 U_{\text{ном}}$ до $1,25 U_{\text{ном}}$. Для керамических изоляторов нормальное испытательное напряжение составляет:

Рабочее напряжение, кВ (пост. ток) (номинальное)	Испытательное напряжение, кВ (пост. ток)	
	при нормальном давлении	при пониженном давлении 90 мм рт. ст.
3	6	3,3
4	8	4,4
8 и выше	Двойное рабочее	Не оговаривается

Для слюдяных опрессованных конденсаторов испытательное напряжение при нормальном давлении составляет $2 U_{\text{ном}}$; при пониженном давлении оно снижается до $1,2 U_{\text{ном}}$, причем для конденсаторов с $U_{\text{ном}} \leq 500$ в допускается понижение давления до 5 мм рт. ст., а при $U_{\text{ном}} = 1000 \div 3000$ в — до 90 мм рт. ст. Для керамических конденсаторов КТК и КДК при $U_{\text{ном}} = 500$ в величина $U_{\text{ис}} = 1500$ в при нормальном давлении, а при давлении 40 мм рт. ст. — $U_{\text{ис}} = U_{\text{ном}}$.

Таким образом, снижение давления до 5 мм рт. ст. (высота над уровнем моря порядка 35 км) допускается только для конденсаторов с небольшим рабочим напряжением, менее 500 в; при повышении напряжения, даже при снижении $U_{\text{ис}}$ величина давления воздуха оговаривается не ниже 40—90 мм рт. ст. (15—20 км над уровнем моря). При высоких рабочих напряжениях, порядка 10—30 кВ нижним пределом допускаемого давления окружающего воздуха обычно является 400—450 мм рт. ст. (менее 5 км над уровнем моря) даже при снижении испытательного напряжения до $1,1 U_{\text{ном}}$. Это объясняется тем,

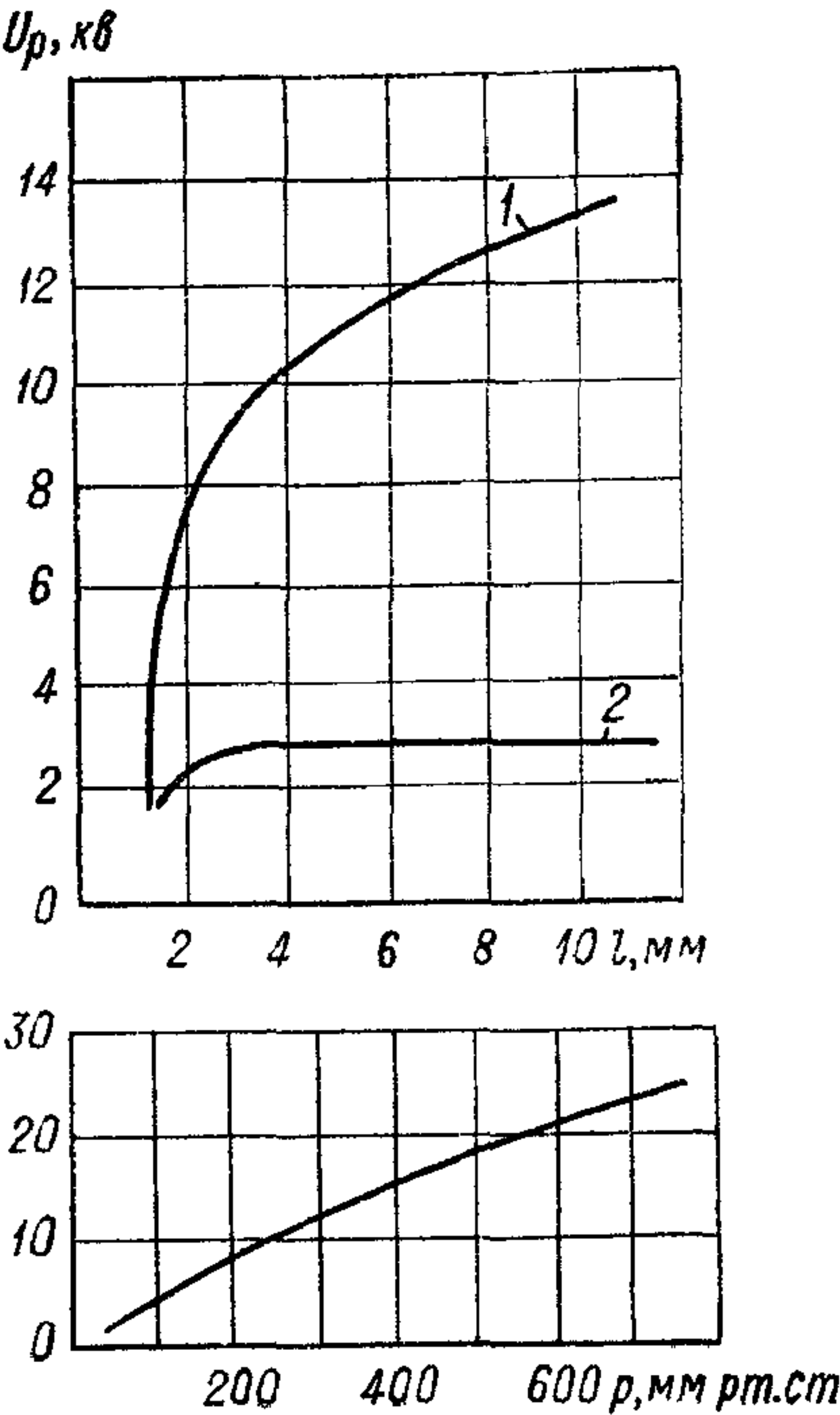


Рис. 125. Зависимость разрядного напряжения по поверхности изолятора от длины пути разряда (вверху) при нормальном давлении (1) и при пониженном давлении 100 мм рт. ст., (2) и от давления (внизу) при постоянном значении пути разряда.

что даже при значительном увеличении высоты выводных изоляторов и усложнении их конфигурации для увеличения пути разряда не удастся добиться достаточной величины разрядного на-

пряжения при малых давлениях окружающей среды.

В связи с этим возникают серьезные трудности с применением высоковольтных конденсаторов даже на высотах порядка 10 км, являющихся обычными для современной гражданской авиации. Если удастся разместить конденсаторы вместе с другими деталями внутри уплотненного корпуса, эти трудности отпадают, но такой выход не всегда возможен. В некоторых случаях приходится отказываться от применения выводных изоляторов и осуществлять вывод конденсатора в виде отрезка изолированного провода, изоляция которого рассчитана на требуемое рабочее напряжение. Присоединение другого конца провода к нужной точке электрической схемы при условии герметизации аппарата в уплотненном кожухе производится после ввода этого провода внутрь кожуха через специальное уплотнение.

Для создания высоковольтных выводных изоляторов, пригодных для работы в разреженной атмосфере, был использован принцип локальной защиты, по которому закрывается доступ воздуха к поверхности керамического изолятора между электродами с помощью натягивания на изолятор резинового колпачка специальной формы, переходящего далее в рези-

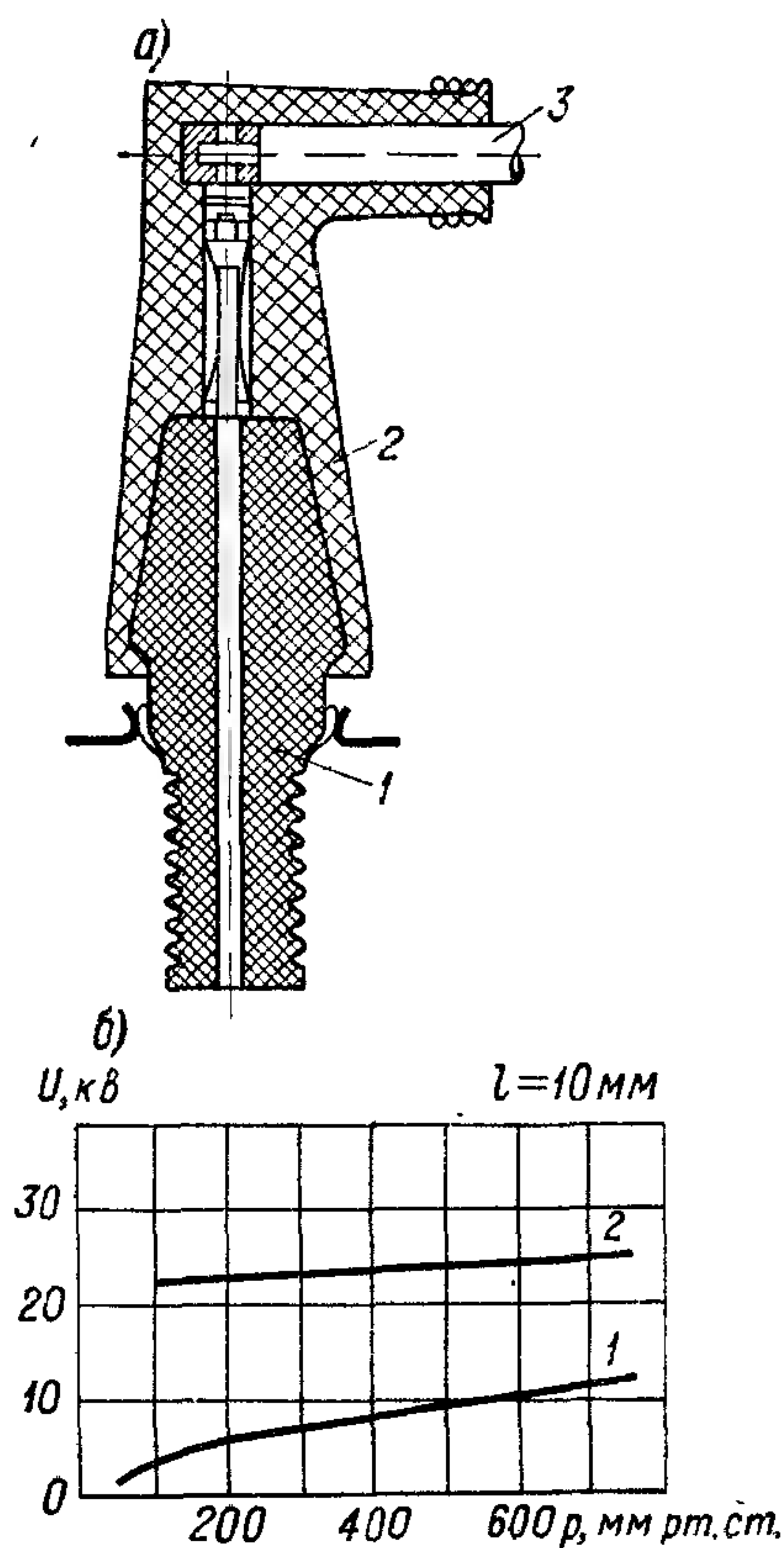


Рис. 126. Локальная защита выводных изоляторов при пониженных давлениях: а — конструктивное оформление.

1 — керамика; 2 — резина; 3 — выводной проводник;

б — зависимость разрядного напряжения от давления для поверхности керамического изолятора (1) и для поверхности раздела между керамикой и резиной (2) при наличии локальной защиты.

новую изоляцию соединительного провода (рис. 126, а). На поверхности раздела между резиной и керамикой при достаточном натяжении локальной защиты разрядное напряжение заметно выше, чем на поверхности раздела керамика — воздух, и мало зависит от давления воздуха (рис. 126, б). Форму локальной защиты следует выбирать с таким расчетом, чтобы при плотном

прилегании резины к керамике в области положительных температур не могло образовываться пор между керамикой и резиной в условиях воздействия температур ниже нуля. По данным В. Н. Таирова, при расчете размеров изоляторов с локальной защитой при определении длины хвостовика, входящего внутрь корпуса конденсатора и погруженного в масло (или иной жидкий диэлектрик), можно принимать значение напряженности поля на поверхности порядка 1 кв/мм , а при определении наружной высоты изолятора брать значение E на поверхности раздела резина — керамика равным $0,6 \text{ кв/мм}$.

Для слюдяных и керамических изоляторов низкого напряжения, не имеющих влагозащитных корпусов с изоляторами, снижение давления окружающей среды опасно с точки зрения снижения разрядного напряжения по закраине конденсатора. В связи с этим для них и применяется указанное выше снижение испытательного напряжения при малых давлениях окружающего воздуха. Выше было показано, что при снижении давления уменьшается напряжение короны у краев обкладок, даже если конденсатор залит маслом или вазелином (§ 39). Это также заставляет ограничивать величину $U_{ис}$ при пониженных давлениях.

При снижении давления окружающей среды внутри конденсатора, имеющего упругие стенки корпуса или негерметизированную конструкцию, возможны деформации, приводящие к изменению его емкости. Так, для слюдяных конденсаторов негерметизированного типа наблюдалось снижение емкости на $0,01—0,20\%$ и даже до 2% при уменьшении давления от 760 до 125 мм рт. ст. . Снижение давления внутри корпуса может привести к снижению напряжения начала ионизации в воздушных включениях. Такие явления не должны наблюдаться у конденсаторов герметизированной конструкции с жесткими стенками корпусов.

В рекомендациях МЭК (публикация 68-2) предусмотрено испытание «М» на действие пониженного атмосферного давления. При этом устанавливаются следующие степени жесткости:

Степень жесткости	Данные МЭК		Советские нормы, давление, мм рт. ст.	Степень жесткости	Данные МЭК		Советские нормы, давление, мм рт. ст.
	давление, мбар	примерная высота, км			давление, мбар	примерная высота, км	
I	—	—	5	V	300	8,5	400
II	20	26	15	VI	533	4,3	720 -780
III	44	20	33	VII	600	3,5	—
IV	85	16	64	VIII	700	2,2	—

Указанные давления должны поддерживаться в барокамере с точностью $\pm 5\%$. На высотах до 1 км нормальным давлением считается атмосферное давление $860—1060 \text{ мбар}$. Приведенные в табличке соотношения между давлением и высотой соответствуют

наиболее неблагоприятным условиям. Предусматривается возможность проведения испытаний при пониженных давлениях с одновременным воздействием на испытуемые конденсаторы высокой или низкой температуры в соответствии с испытанием *A* (холод) или *B* (сухое тепло) (§ 41). Предусматривается также возможность подачи напряжения на испытуемые конденсаторы во время их нахождения в барокамере. Время испытания в барокамере должно быть оговорено в технических условиях на конденсаторы. После извлечения из барокамеры, перед проверкой электрических свойств конденсаторы должны выдерживаться в нормальных условиях 1—2 ч.

В космических условиях приходится иметь дело с резко сниженными значениями остаточного давления воздуха в сравнении с теми, которые рассматривались выше, — менее 10^{-6} мм рт. ст. В этих условиях электрическая прочность окружающей среды резко возрастает (рис. 69), и уже не приходится опасаться возможности перекрытия по выводным изоляторам. Однако соображения о возможности снижения давления внутри корпуса остаются в силе, причем возникающий при этом вакуум внутри конденсатора не столь совершенен, как снаружи, и может быть опасен с точки зрения снижения электрической прочности.

§ 44. Влияние излучений

Новым требованием к качеству конденсаторов в связи с их применением в устройствах атомной энергетики и космической электроники является требование об устойчивости в условиях воздействия различного рода излучений. Обычно рассматривается вопрос о воздействии на конденсаторы гамма- и нейтронных излучений (электромагнитные колебания с частотой 10^{21} гц) или потоков нейтронов (тепловых, или медленных, с энергией порядка 0,025 эв, а также быстрых, с энергией порядка 1 Мэв). В космосе можно также встретиться с воздействием потока протонов.

Для оценки воздействия излучений применяются различные единицы, показывающие интенсивность излучения:

один *рентген* (*r*) — это интенсивность рентгеновского (10^{18} гц) или гамма-излучения, вызывающая появление ионов с суммарным зарядом того или другого знака, равным одной электростатической единице, в объеме воздуха с весом 0,001293 Г (при нормальном давлении и температуре этот объем равен 1 см³). Эта единица соответствует выделению энергии 89 эрг/Г для воздуха; для воды — 93 эрг/Г;

один *рад* (*radiation absorbed dose*) — поглощенная доза радиации — соответствует поглощению энергии в 100 эрг/Г. Часто применяется единица 1 *Мрад* = 10^6 рад = 10^8 эрг/Г = 10 дж/Г = 2,4 кал/Г. Иногда указывается энергия поглощенного излучения, рассчитанная на единицу площади в эрг/см²;

один Кюри (Ки) — соответствует распаду радиоактивного вещества со скоростью $3,7 \cdot 10^{10}$ ядер/сек. Источник распада в 1000 Ки (1 kКи) может дать гамма-излучение с интенсивностью 100 р.

При оценке величины потока нейтронов указывается число нейтронов, падающих на 1 см^2 поверхности за 1 сек, или суммарный поток, прошедший за данный период времени через 1 см^2 поверхности.

Обычно при воздействии на конденсаторы различного рода излучений приходится прежде всего сталкиваться с изменением проводимости диэлектрика, возрастающей за счет появления в диэлектрике свободных электронов. Происходящее при этом снижение сопротивления изоляции является обратимым, и после прекращения облучения постепенно восстанавливается исходное значение. На рис. 127 показано изменение проводимости диэлектрика, вызванное воздействием дозы гамма-излучения в виде прямоугольного импульса. На кривой зависимости $\sigma = f(\tau)$ можно отметить три различных участка: А, Б и В. По данным Гаррисона и его соавторов, на первом участке проводимость возрастает экспоненциально:

$$\sigma - \sigma_0 = A(1 - e^{-\tau/\tau_0}), \quad (178)$$

где постоянная времени τ_0 снижается при увеличении дозы гамма-лучей $\dot{\gamma}$. Эту зависимость можно представить как

$$\tau_0 = k_0 \dot{\gamma}^{-\mu}, \quad (179)$$

где k_0 и μ — эмпирические постоянные.

На втором участке наведенная проводимость достигает установившегося значения, величина которого при постоянстве температуры выражается как:

$$\sigma - \sigma_0 = A_\gamma \dot{\gamma}^\delta, \quad (180)$$

где A_γ и δ эмпирические постоянные.

На третьем участке проводимость снижается согласно выражению

$$\sigma = \sigma_{eq} \sum_{i=1}^{i=n} k_i e^{-\tau/\tau_i}, \quad (181)$$

где σ_{eq} — установившаяся проводимость на втором участке, τ_i — дискретное значение постоянной времени для одного из

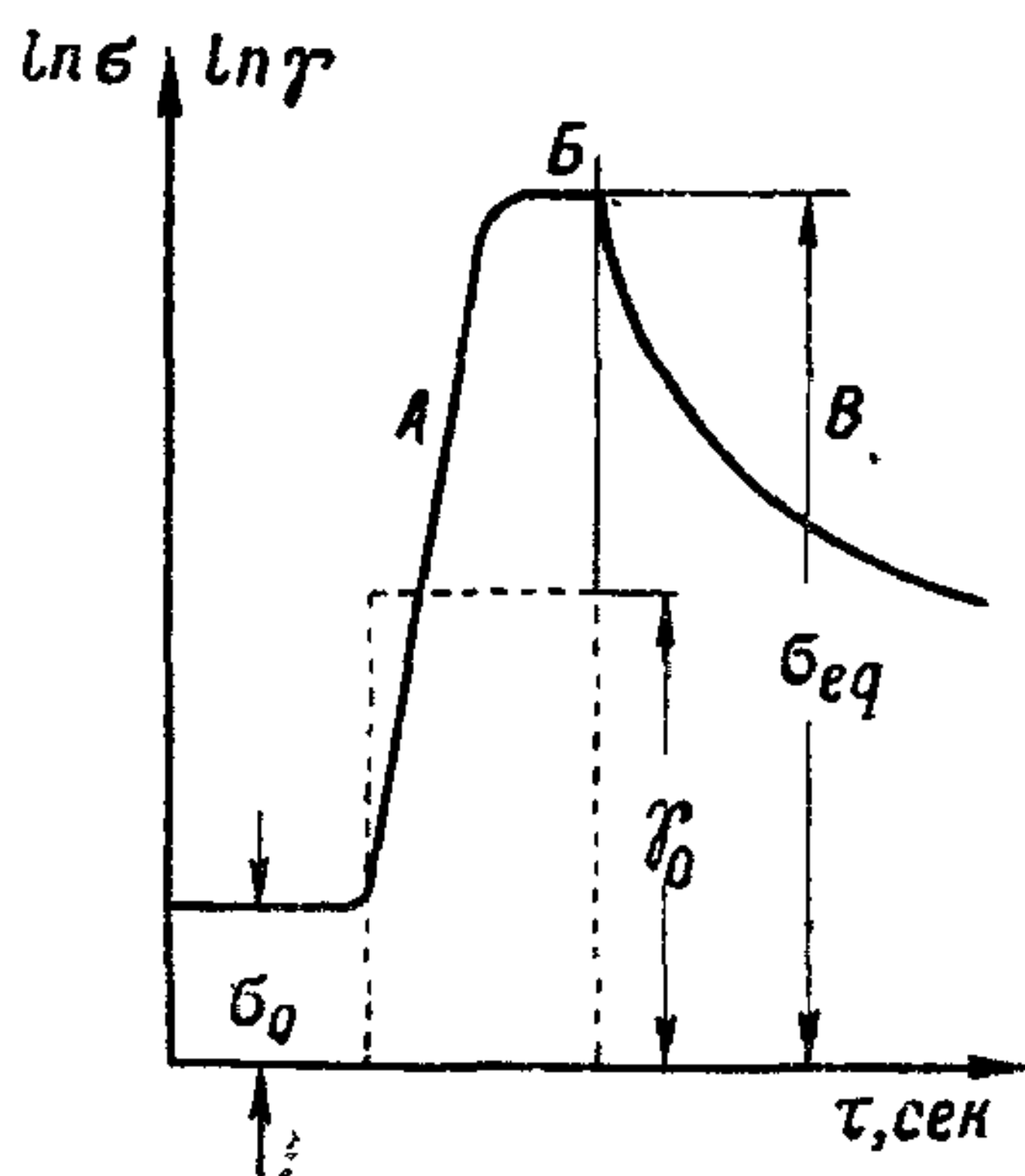


Рис. 127. Изменение проводимости диэлектрика во времени при воздействии прямоугольного импульса гамма-излучения (пояснение в тексте).

отрезков времени на этом участке и k_i — коэффициент, учитывающий относительное влияние данного отрезка на общий ход зависимости.

Установившееся значение проводимости на втором участке σ_{eq} должно иметь две составляющие: первую, обусловленную прямым возбуждением носителей заряда до проводящего состояния за счет облучения, и вторую, возникающую от термического возбуждения захваченных носителей заряда (непроводящее состояние) до проводящего состояния. Вторая из них проявляется при длительном облучении гамма-лучами от постоянного источника, но не имеет места при импульсном облучении.

Зависимость наведенной проводимости от интенсивности комбинированного импульсного облучения гамма-лучами и потоком нейтронов характеризуется формулой

$$\sigma - \sigma_0 = A_{n\gamma} \dot{R}^\delta, \quad (182)$$

где значение $A_{n\gamma}$, как показывает опыт, меньше A_γ в формуле (180), что объясняется отсутствием в данном случае второй составляющей проводимости.

Эффективность воздействия облучения нейтронами (на единицу дозы — *рад/сек*) по сравнению с облучением гамма-лучами, в отношении величины наведенной проводимости, была проверена для двух типов конденсаторов; для бумажных конденсаторов, пропитанных полиизобутиленом, эффективность нейтронов составила 0,044, а для полистирольных конденсаторов — 0,23 от эффективности гамма-лучей.

При проверке формулы (179) было найдено: для полиэтилена $k_0 = 45$, для полистирола — 60 и для эпоксидной смолы — 135; для всех трех материалов получено $\mu = 0,5$. При изменении дозы гамма-облучения в пределах от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^4$ *рад* (H_2O)/*сек* были получены для ряда материалов следующие значения постоянных, входящих в уравнение (180) для установившейся проводимости:

Название материала	δ	A_γ
Полиимид (H = film)	1,1	$5,8 \cdot 10^{-18}$
Эпоксидная смола 1478-1	1,0	$3,3 \cdot 10^{-17}$
Полипропилен	0,88	$3,8 \cdot 10^{-17}$
Полистирол	0,97	$4,0 \cdot 10^{-17}$
Политетрафторэтилен	1,0	$1,2 \cdot 10^{-16}$
Полиэтилен	0,74	$5,5 \cdot 10^{-16}$

Измерения проводимости производились при температуре 40—60° С. При проверке формулы (182) для рядов типов конденсаторов с различными диэлектриками в условиях воздействия

импульса гамма-излучения и потока нейтронов при температуре 25° С были получены следующие данные:

Тип конденсатора	Емкость, мкф	δ	$A_{n\gamma}$	Пределы изме- нения дозы, рад (H ₂ O)/сек
Майларовый металлизирован- ный	0.2—1	1,2	$2,5 \cdot 10^{-21}$	$5 \cdot 10^5—4 \cdot 10^8$
Майларовый	3	1,3	$8,4 \cdot 10^{-21}$	$3 \cdot 10^4—2 \cdot 10^8$
Майларовый фольговый	0,01—0,1	1,1	$1,0 \cdot 10^{-20}$	$5 \cdot 10^5—4 \cdot 10^8$
Ацетатцеллюлозный	3,9	1,0	$3,3 \cdot 10^{-20}$	$5 \cdot 10^5—3 \cdot 10^8$
Полистирольный	1,0	0,97	$3,1 \cdot 10^{-19}$	$5 \cdot 10^4—4 \cdot 10^8$
Бумажно-полиизобутилено- вый	1,0	0,94	$3,3 \cdot 10^{-19}$	$1 \cdot 10^5—4 \cdot 10^8$
Полиимидный (H = film)	0,1	1,1	$5,7 \cdot 10^{-19}$	$3 \cdot 10^4—2 \cdot 10^8$
Слюдобумажный	1,0	1,1	$3,3 \cdot 10^{-19}$	$1 \cdot 10^4—4 \cdot 10^7$
Танталовый оксидный	1,0	1,0	$3,3 \cdot 10^{-18}$	$1 \cdot 10^5—6 \cdot 10^7$
То же	10,0	1,0	$9,3 \cdot 10^{-18}$	$1 \cdot 10^5—6 \cdot 10^7$

Приведенные здесь данные показывают, что для большинства диэлектриков, обследованных в этой работе, показатель степени δ в формулах (180) и (182) мало отличается от единицы, т. е. приращение проводимости, вызванное воздействием излучения, происходит примерно пропорционально интенсивности излучения $\dot{\gamma}$ или \dot{R} . Наименьшие изменения проводимости при воздействии гамма-излучения из 6 материалов дал полиимид, однако при испытании в конденсаторах (т. е. в присутствии обкладок) на воздействие гамма-излучения и потока нейтронов он оказался хуже полистирола. В этих условиях наилучшим материалом оказался полиэтилентерефталат (майлар) как при металлизированных, так и при фольговых обкладках. Наихудшие результаты были получены для танталовых электролитических конденсаторов. Преимущества майларовых конденсаторов были подтверждены также в работе Виклейна с сотрудниками. В этой работе следующими за майларовыми по возрастанию проводимости под действием излучений шли слюдяные и бумажные конденсаторы, которые дали результаты одного порядка. Заметно увеличенная проводимость при облучении была получена у танталовых конденсаторов и лишь немного меньшая у керамических низкочастотных конденсаторов.

В работе Виклейна и Дикхаута использовался импульс нейтронно-гамма-излучения с интенсивностью, достигавшей максимума за 150 мксек и в среднем составлявшей $5 \cdot 10^7$ рад/сек. При этом получалась доза 5000 рад и количество нейтронов порядка 10^{13} на 1 см². В этих условиях приведенная проводимость также подчинялась выражению (182), причем было получено значение $\delta \approx 0,7 \div 1,0$. Изменения емкости, проверенные для слюдяных конденсаторов и для бумажных, пропитанных полиизобутиленом оказались менее 0,1 %. Облучение не вызвало снижения электрической прочности этих конденсаторов. Для танталовых конденсаторов наблюдалось кратковременное появление напряжения на

обкладках в отсутствии внешнего источника напряжения. В работе Бубрицкого были исследованы электролитические конденсаторы, подвергнутые облучению гамма-лучами при дозах $4,4 \cdot 10^6$ и $1,3 \cdot 10^7$ р. Об изменениях, происшедших при этом в конденсаторах, судили по потере веса. Полученные данные сравниваются ниже с потерей веса при старении в рабочем режиме в течение 500 ч.

Тип конденсатора	Номинальные данные		Потеря в весе, мг		
	C, мкф	U, в	после $4,4 \cdot 10^6$ р	после $1,3 \cdot 10^7$ р	после старения 500 ч
Танталовый фольговый	2	100	2,2	4,0	11—13
Танталовый жидкостный.	22	100	0,7	0,8	1—2
Алюминиевый сухой, на 125° С	100	25	0,24	0,22	7—7,2

Как показал опыт, изменение веса после воздействия излучения оказалось заметно меньшим, чем при обычном старении в течение относительно малого времени. Электрические свойства после облучения практически не изменились.

В работе Дошей, Ламберта и Милларда были обследованы танталовые оксидно-полупроводниковые конденсаторы на 35 и 50 в (5—20 мкф). При облучении гамма-лучами конденсаторы находились в высоком вакууме ($p = 10^{-5} \div 10^{-6}$ мм рт. ст.) и под напряжением 50 или 100 % от номинального. При дозе облучения 10^2 р/ч и времени испытания 144 ч емкость, угол потерь и ток утечки заметно не изменились. Увеличение дозы до $1,1 - 4,5 \times 10^5$ р/ч привело к небольшому увеличению емкости и угла потерь и заметному увеличению тока утечки.

Конденсаторы, находившиеся под напряжением 50 % $U_{\text{ном}}$, дали более заметные изменения параметров, чем аналогичные конденсаторы, которые облучались при воздействии напряжения 100 % $U_{\text{ном}}$.

Приведенные здесь данные относятся к сравнительно не очень сильному излучению, порядка $10^9 - 10^{10}$ эрг/Г. Увеличивая интенсивность излучения, можно прийти к таким его значениям, которые вызовут полное разрушение материала. Значения дозы облучения, достаточной для полного разрушения некоторых диэлектриков, по данным Шена, приводятся ниже:

Название диэлектрика	Разрушающая доза, эрг/см ²
Полистирол	$1,6 \cdot 10^{10}$
Полиэтилен	$1,6 \cdot 10^{15}$
Политетрафторэтилен	$8,0 \cdot 10^{14}$
Полисилоксановая резина	$6,4 \cdot 10^{14}$
Поливинилхлорид	$3,0 \cdot 10^{14}$
Обычная резина	$2,0 \cdot 10^{14}$
Политрифтормонохлорэтилен	$1,6 \cdot 10^{14}$

До сих пор мы рассматривали воздействие гамма-лучей и потока нейтронов. В космосе, в частности в зоне пояса Ван Аллена, приходится учитывать также воздействие протонов и электронов с высокой энергией. Для нейтрона материя является практически пустым пространством, в котором возможны лишь случайные редкие столкновения с ядрами атомов. Для протона, несущего заряд, — это область постоянных и опасных взаимодействий. От проникновения электронов легче защититься экранами, но средний протон в поясе Ван Аллена может пронизывать до 4 мм свинца. В органических материалах средний путь пробега протона может достигать 80 мм и выше, причем особо разрушительный эффект наблюдается в конце пути. На пути движения протона остается след в виде непрерывного ряда ионизированных частиц, что может приводить к снижению электрической прочности в 4 раза и выше. Быстродействующие протоны, взаимодействуя с электронной оболочкой атомов, вызывают возбуждение и ионизацию молекул, причем последние могут при этом распадаться на атомы и свободные радикалы. Это приводит к разрушению материала. В случае органических жидкостей действие облучения может приводить к выделению газов с объемом от 0,2 до 12 объемов исходной жидкости при облучении дозой 10^{10} эрг/г. Хлорированные и фторированные углеводороды под действием облучения выделяют активные агенты коррозии: свободные галоиды или галоидно-водородные кислоты: HCl и HF.

По данным Шена, среди конденсаторов менее устойчивы к излучению бумажные, пропитанные маслом (особенно пропитанные хлорированными жидкостями), пленочные и электролитические (особенно содержащие электролиты на основе борной кислоты); более устойчивы конденсаторы с неорганическим диэлектриком: керамические, слюдяные и стеклянные. В данном случае под выражением «керамические» следует, по-видимому, понимать высокочастотные, так как по данным Виклейна, приведенным выше, устойчивость низкочастотных керамических конденсаторов к воздействию излучений лишь немного выше, чем у танталовых электролитических. Можно полагать, что наиболее устойчивыми к воздействию излучения являются стеклянные конденсаторы (стеклоэмалевые и стеклопленочные). По данным Уэллера,¹ после облучения потоком нейтронов с интенсивностью 10^{14} нейтронов на 1 см^2 никаких химических изменений в конденсаторах этого типа не было зарегистрировано.

Металлы более устойчивы к воздействию излучения, чем диэлектрики, особенно органические; поэтому диэлектрик в конструкции конденсатора является более чувствительным к облучению элементом, чем обкладки, выводы и другие проводящие де-

¹ B. L. Weller. Vitreous enamel dielectric capacitors. «IRE Wescon Convent. Rec.», 1957, 1, № 6, p. 25—29.

тали. Вместе с тем, надо иметь в виду, что при достаточно сильном облучении конденсаторов, кроме упомянутых выше изменений в материалах, может сказываться также их нагрев за счет поглощения энергии излучения. Этот нагрев больше для металлов, чем для диэлектриков, а поэтому, с этой точки зрения, при оценке устойчивости конденсатора к излучению приходится считаться и с материалом обкладок. Нагревание конденсатора может привести к дополнительному увеличению проводимости диэлектрика (кроме его возрастания под действием облучения), к увеличению потерь и к изменениям емкости. Наименьшее нагревание наблюдается в случае металлов наименьшей плотности, в частности для алюминия, который и следует поэтому рекомендовать в качестве обкладок для конденсаторов с повышенной устойчивостью к излучениям.

В приведенных выше данных по исследованию конденсаторов к воздействию радиации можно найти известные противоречия и несогласованности, например, во второй табличке данного параграфа пленочный конденсатор из полиэтилентерефталата оказался значительно более устойчивым к возникновению добавочной проводимости под действием излучения, чем слюдобумажный (конденсатор с диэлектриком из интегрированной слюды), хотя считается, что неорганические диэлектрики должны быть более устойчивыми, чем органические. Это можно объяснить тем, что исследования в этой области носят еще начальный характер и методика эксперимента и интерпретация получаемых данных требуют дополнительного уточнения.

Все же, по-видимому, можно считать установленным, что для получения конденсатора с повышенной устойчивостью к радиации в качестве диэлектрика лучше брать неорганические материалы типа безщелочного стекла или безтитановой керамики, а в качестве материала для обкладок — легкие металлы типа алюминия.

§ 45. Механические воздействия

В условиях транспортировки, монтажа в аппаратуре и эксплуатации конденсаторы могут подвергаться различным механическим воздействиям. Наиболее опасным последствием при таких воздействиях является возможность появления «обрыва» за счет поломки проволочного вывода снаружи или внутри конденсатора или нарушения целостности контактного узла между выводом и обкладкой. Повреждения такого типа, как отмечено выше, относят к катастрофическим отказам. Механические воздействия могут также приводить к нарушению герметичности конструкции, прежде всего в местах крепления проходных изоляторов, к трескиванию заливочного компаунда или опрессовочной пластмассы и т. п. В этих случаях последующее воздействие влажности окружающего воздуха неизбежно приведет к ухудшению элек-

трических свойств конденсатора (§ 42) и послужит причиной появления отказов по уходу параметров.

При транспортировке конденсаторов опасны механические усилия, вызываемые т р я с к о й, особенно при перевозке автомашиной по плохой дороге. Обычно условия тряски имитируются механическим испытанием, предусматривающим до 2—5 ударов в секунду, с амплитудой несколько миллиметров. Механические воздействия в условиях эксплуатации, в частности в самолетном оборудовании, характеризуются воздействием в и б р а ц и й. При оценке устойчивости конденсаторов и других деталей к вибрациям различают их вибропрочность и виброустойчивость. Под в и б р о п р о ч н о с т ь ю понимают свойство противостоять разрушающему воздействию вибрации и после длительного ее воздействия сохранять способность к выполнению своих функций. Под в и б р о у с т о й ч и в о с т ь ю понимают способность выполнять свои функции в условиях вибрации, т. е. в этом случае электрические испытания надо производить во время воздействия вибрации на конденсатор, а не после воздействия. В технических условиях оговариваются продолжительность испытания, частота вибраций f_v и амплитуда колебаний a_v . Для большинства типов конденсаторов испытания проводились ранее в течение 3 ч при $f_v = 45 \div 50$ гц и $a_v = 0,4$ мм (размах 0,8 мм).¹ Теперь в ряде случаев применяют и более высокие частоты. В рекомендациях МЭК (публикация 68-2) предусмотрено испытание F (вибрация), см. таблицу на следующей странице. Применяемые вибростенды должны отвечать следующим требованиям:

а) плавное качание частоты в диапазоне 10—500—10 гц по логарифмическому закону или в соответствии с его приближенными линейными диапазонами в течение 15 мин. Колебания должны быть синусоидальными с размахом 1,5 мм или ускорением, равным 10 g, если оно меньше ускорения, создаваемого при колебаниях с размахом в 1,5 мм;

б) плавное качание частоты в диапазоне 10—55—10 гц по линейному закону в течение 1 мин. Колебания должны быть синусоидальными с размахом 1,5 мм или 0,75 мм;

в) плавное качание частоты в диапазоне 55—500—55 гц по логарифмическому закону или в соответствии с его приближенными линейными диапазонами в течение 8,5 мин. Колебания должны быть синусоидальными с ускорением, равным 10 g.

Колебания, передаваемые изделию через крепление, должны быть в основном синусоидальными и прямолинейными. Изделия должны закрепляться нормальным для них способом, если он является единственным. В противном случае цилиндрические конденсаторы, имеющие проволочные выводы и вес не более 15 г, крепятся, как показано на рис. 128, а те же конденсаторы

¹ Д. М. Казарновский. Испытания радиотехнических материалов и деталей. Госэнергоиздат, М.—Л., 1953.

весом более 15 г должны жестко крепиться к монтажной плате вибростенда. Прочие конденсаторы крепятся согласно требованиям технических условий.

Степень жесткости	IV			VI	VIII
	Метод А	Метод В			
Диапазон частот, <i>гц</i>	10—500	10—55	55—500	10—55	10—55
Размах (<i>мм</i>) или ускоре- ние	1.5 10 <i>g</i>	1,5 —	— 10 <i>g</i>	1,5 —	0,75 —
Длительность прохож- дения диапазона, <i>мин</i>	15	1	8,5	1	1
Закон изменения час- тоты	Логарифми- ческий	Линей- ный	Логарифми- ческий	Линейный	
Число циклов для каж- дого из трех направ- лений	12	80	12	120	40
Общая длительность, <i>ч</i>	9	4	5	6	2

Изделия следует испытывать таким образом, чтобы они поочередно подвергались вибрациям вдоль трех взаимно перпендикулярных осей, одной из которых должна быть ось, наиболее важная для изделия при работе; если выбор осей несущественен, то

такой осью должна быть главная ось конструкции. Изделия подвергаются испытанию при одной из степеней жесткости, указанной в табличке, в соответствии с требованиями технических условий.

Для степени жесткости IV выбор между методами А или В зависит от типа имеющегося вибростенда. Указания МЭК относятся только к испытанию на вибропрочность, которая оценивается путем сравнения результатов измерения основных параметров конденсатора до и после испытания на вибростенде.

Рис. 128. Крепление конденсаторов при испытании на вибрацию.

Отечественный ГОСТ 6580—63 также предусматривает только испытание на вибропрочность, т. е. без приложения электрической нагрузки во время испытания. Для определения режимов испытания применяется формула

$$G = \frac{2X_0f^2}{500},$$

где: G — ускорение вибрации, X_0 — амплитуда вибрации в мм и f — частота в гц.

Нижний предел частоты, в отличие от данных МЭК, снижен до 5 гц, а верхний предел при особо жестких испытаниях повышается до 1000 гц и даже в некоторых случаях до 2000—3000 гц при ускорении до 30 g.

Следует отметить, что при определенной частоте вибраций, в зависимости от веса и размеров конденсатора, а также метода его закрепления в аппаратуре, может возникнуть механический резонанс, способный привести к нарушению работоспособности конденсатора. Это обстоятельство надо учитывать при монтаже конденсаторов в аппаратуре. Методика выявления резонанса рассматривается МЭК, но еще не утверждена.

В некоторых случаях современной техники изделия в процессе их применения должны выдерживать резкое нарастание скорости движения. В связи с этим для ряда типов конденсаторов представляет интерес их устойчивость к воздействию больших ускорений. Она характеризуется кратностью K ускорения g_k (применяемого при испытании конденсаторов) по отношению к ускорению силы тяжести g :

$$g_k = Kg.$$

Обычно для создания больших ускорений используют установки вращающегося типа с быстрым нарастанием центробежной силы, воздействующей на испытуемые конденсаторы. Такие установки применяют для получения K порядка нескольких десятков. С еще бóльшими ускорениями можно встретиться при ударных испытаниях, когда при многократных ударах нагрузка может достигать 75—150 g, а при однократных ударах — даже до 500—1000 g. Таким жестким испытаниям подвергают лишь единичные типы конденсаторов.

Наиболее опасным механическим повреждением при монтаже является поломка или разрыв выводов или скручивание контактной гайки для выводов, имеющих нарезку. В рекомендациях МЭК предложено испытание U (прочность выводов), предусматривающее проведение следующих проверочных опытов:

1. И с п ы т а н и е н а р а с т ы ж е н и е — способность выводов выдержать определенное растягивающее усилие, направленное вдоль оси. Нагрузка должна прикладываться постепенно и выдерживаться в течение 10 сек. В соответствии с требованиями технических условий эта нагрузка может составлять: 0,5, 1, 2 или 4 кг.

2. И с п ы т а н и е н а п е р е г и б проволочных или ленточных выводов предусматривает медленное изгибание вывода под углом 90° и разгибание в исходное положение, что считается за один перегиб. Последовательные перегибы должны проводиться в противоположных направлениях. Количество перегибов устанавливается в технических условиях. Перегиб производится по радиусу 0,75 мм (рис. 129, а),

3. Скручивание для проволочных выводов предусматривает сгибание вывода под углом 90°, как показано на рис. 129, б; корпус изделия или устройство для закрепления вывода поворачивается на 360° вокруг первоначальной оси изогнутого вывода, что составляет один поворот. Длительность поворота должна быть порядка 5 сек. Последовательные повороты должны проводиться в противоположных направлениях: всего три поворота.

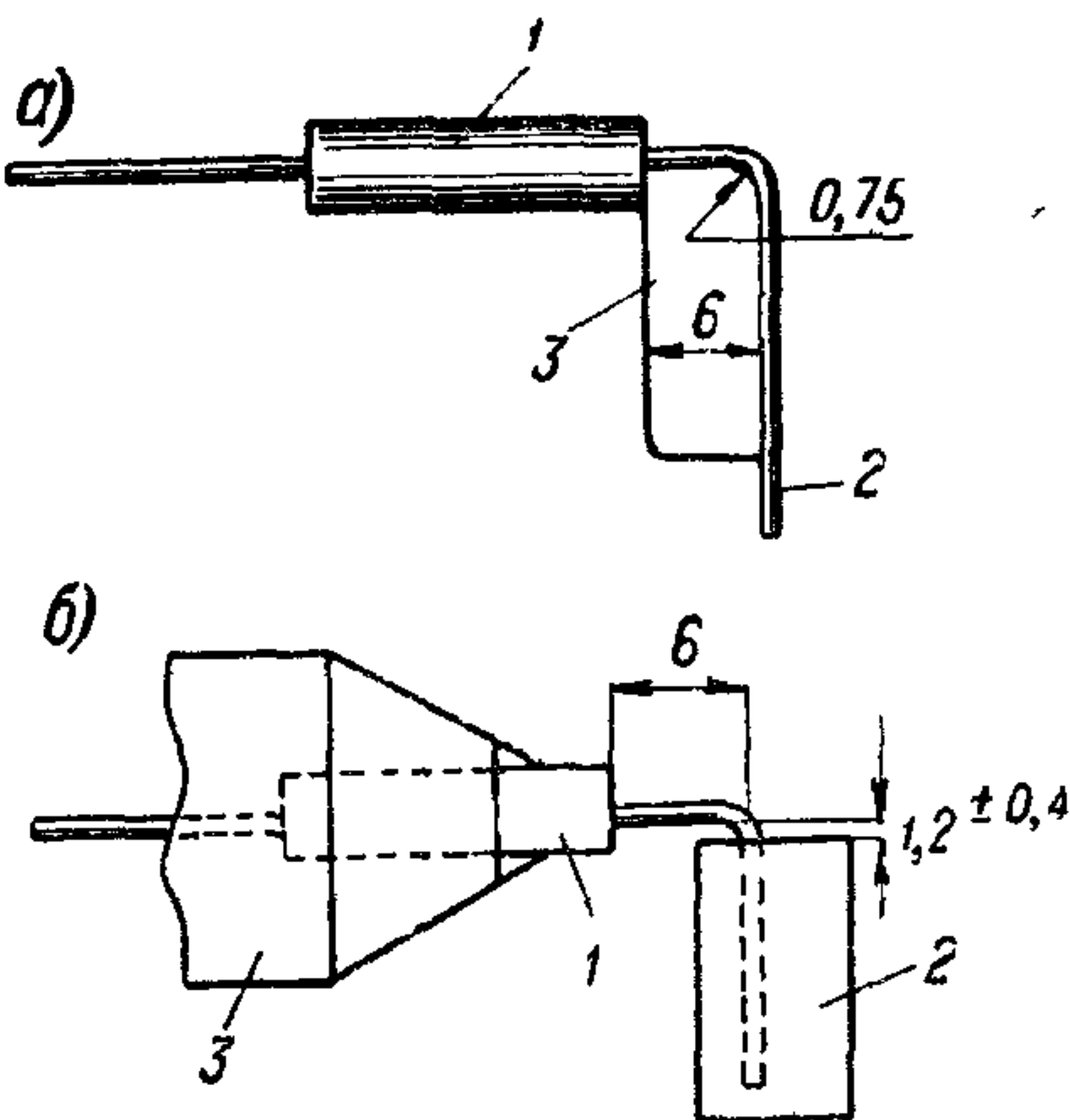


Рис. 129. Механические испытания выводов: а — на перегиб; б — на скручивание.

4. Скручивание гаек и выводов с винтовой нарезкой (испытание на скручивающий момент) служит для определения способности вывода выдерживать скручивающие моменты, аналогичные тем, которым они будут подвергаться в условиях нормального монтажа. Винты или гайки закручиваются под воздействием момента, величина которого выбирается в соответствии с диаметром резьбы, согласно приведенным ниже данным, а затем вновь ослабляются.

Диаметр резьбы, мм	2,6	3,0	3,5	4,0	5,0	5,5	6,0
Скручивающий момент, н·м	0,39	0,49	0,78	1,17	1,76	2,156	2,45

Для того чтобы конденсатор мог успешно выдержать механические испытания, приходится уделять должное внимание как прочности его выводов и их надежному закреплению, так и хорошему уплотнению конденсаторных секций в корпусе, препятствующему их перемещению при механических воздействиях, которое могло бы привести к обрыву соединительных проводников.

Глава VIII

ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДЕНСАТОРОВ

§ 46. Общие соображения

При рассмотрении внешних факторов, влияющих на работу конденсаторов, в качестве одного из важнейших мы назвали температуру окружающей среды, оказывающую влияние на все важнейшие электрические характеристики конденсатора. Необходимо учесть, что температура конденсатора за счет наличия в нем по-

терь энергии, переходящих в тепло, нагревающее конденсатор, всегда будет несколько выше температуры окружающей среды, а именно эту повышенную температуру мы должны принимать во внимание при оценке изменения электрических характеристик конденсатора в условиях работы.

Выше мы уже отмечали, что при установившемся тепловом режиме (когда при заданных условиях работы конденсатора температура на его поверхности достигает установившегося значения t_k) достигается равновесие между количеством тепла, выделяемого внутри конденсатора (определяемого величиной активной мощности P_a), и количеством тепла, отдаваемого в окружающую среду с поверхности конденсатора (формула 87). При этом для определения разности температур $t_k - t_0$ (где t_0 — температура окружающей среды) можно воспользоваться формулой (88). В эту формулу входит коэффициент теплоотдачи α_t , который надо уметь находить при различных условиях охлаждения конденсатора. Зная величину α_t , поверхность охлаждения конденсатора и величину выделяемой в нем активной мощности, мы можем найти разность $t_k - t_0$, а следовательно, и температуру на поверхности корпуса конденсатора, если нам известна температура окружающей среды.

Однако, если мы имеем дело с конденсатором относительно больших размеров, особенно с органическим диэлектриком, обладающим низкой теплопроводностью (см. табл. 3, выше), то температура t_k не даст нам правильного представления о нагреве конденсатора, так как внутри конденсатора температура может быть значительно выше, чем на поверхности корпуса. В связи с этим возникает задача о нахождении максимальной температуры $t_{\text{макс}}$ внутри конденсатора, представляющая известные трудности. До сих пор мы говорили об установившемся тепловом состоянии конденсатора. На практике, в частности при кратковременном включении конденсатора под напряжение или при кратковременном воздействии на работающий конденсатор повышенного напряжения, приходится рассматривать не установившийся тепловой режим конденсатора. В этом случае для нахождения температуры, до которой может нагреться конденсатор за данный отрезок времени, необходимо найти его тепловую постоянную времени, для чего надо знать теплоемкость конденсатора.

Основные сведения о перечисленных здесь важнейших тепловых характеристиках конденсаторов излагаются в данной главе.

§ 47. Теплоотдача конденсаторов при естественном воздушном охлаждении

Рассматривая вопрос о расчете электрической прочности при тепловом пробое (§ 34), мы указали значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_t = 3 \cdot 10^{-4}$ кал/сек \cdot см² \cdot град или $1,25 \cdot 10^{-3}$ вт/см² \cdot град.

Обычно для предварительных расчетов нагрева конденсаторов при естественном воздушном охлаждении рекомендуется применять $\alpha_T = 1 \cdot 10^3 \text{ вт/см}^2 \cdot \text{град}$. При более точных расчетах надо иметь в виду, что α_T не является постоянной величиной, а может изменяться в довольно заметных пределах, в зависимости от размеров и конфигурации конденсатора и от температуры окружающей среды.

При естественном воздушном охлаждении отвод тепла в окружающую среду осуществляется двумя путями: за счет омыwania воздухом стенок корпуса конденсатора (конвекции) и за счет непосредственного теплоизлучения с поверхности корпуса. Поэтому значение коэффициента теплоотдачи можно представить как сумму двух слагаемых: α_K — обусловленного конвекцией, и $\alpha_{\text{и}}$ — обусловленного излучением, т. е.

$$\alpha_T = \alpha_K + \alpha_{\text{и}}. \quad (183)$$

Для определения коэффициента теплоотдачи при естественном воздушном охлаждении, обусловленного конвекцией α_K , современная теплотехника использует метод подобия. Подобие обуславливает существование особых величин, сохраняющих одно и то же значение для всех подобных между собой явлений. Эти величины называются критериями подобия. При изучении теплоотдачи за счет конвекции приходится пользоваться следующими критериями подобия:

Gr — критерий Грасгофа для механического подобия движущейся жидкости или газа, когда разность плотностей определяется разностью температур:

$$\text{Gr} = \beta \Delta t \frac{g l^2}{\nu^2}, \quad (184)$$

где β — коэффициент объемного расширения в град^{-1} , g — ускорение силы тяжести в м/сек ; Δt — температурный напор в град , ν — коэффициент динамической вязкости в $\text{м}^2/\text{сек}$, l — определяющий размер в м ;

Pr — критерий Прандтля, характеризующий физические свойства рабочей жидкости (газа):

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a}, \quad (185)$$

где a — коэффициент температуропроводности $\text{м}^2/\text{ч}$:

$$a = \frac{\lambda}{\gamma C_p}. \quad (186)$$

Здесь C_p — теплоемкость в $\text{ккал/кг} \cdot \text{град}$, λ — коэффициент теплопроводности в $\text{ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$, γ — удельный вес в кг/м^3 ;

Nu — критерий Нуссельта для теплового подобия:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_K l}{\lambda}, \quad (187)$$

где α_k — коэффициент теплоотдачи в $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$, l — определяющий размер в м, λ — как и выше, коэффициент теплопроводности в $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$.

Естественное воздушное охлаждение осуществляется за счет свободного движения воздуха вдоль охлаждаемой поверхности, обусловленного разностью плотностей нагретых и холодных частиц. При этом форма тела имеет мало влияния на процесс теплообмена между охлаждаемым телом и воздухом; основное влияние оказывает протяженность поверхности, вдоль которой происходит движение нагретого воздуха.

Обобщенная критериальная формула для данного случая теплоотдачи имеет вид:

$$\lg \text{Nu}_T = f(\lg \text{Gr} \cdot \text{Pr})_T. \quad (188)$$

В критерии подобия определяющим геометрическим (линейным) размером для цилиндров или шаров является диаметр и для плит — высота. В качестве определяющей температуры принимается средняя температура пограничного слоя воздуха у охлаждающей поверхности:

$$t_T = \frac{t_k + t_0}{2}. \quad (189)$$

Экспериментально было показано, что зависимость (188) в билогарифмическом масштабе может быть представлена системой ломаных прямых (рис. 130, а), образующих четыре участка. Эти участки соответствуют четырем режимам движения воздуха (рис. 130, б): 1) пленочному режиму, при котором у охлаждаемой поверхности образуется неподвижная пленка воздуха; 2) слоистому (ламинарному) режиму, при котором движутся параллельные слои воздуха; 3) локонообразному режиму, при котором движение воздуха происходит волнообразно и 4) вихреобразному (турбулентному) режиму, при котором движение воздуха становится беспорядочным.

Для каждого из этих участков уравнению (188) можно придать вид:

$$\text{Nu}_T = c (\text{Gr} \cdot \text{Pr})_T^n \quad (190)$$

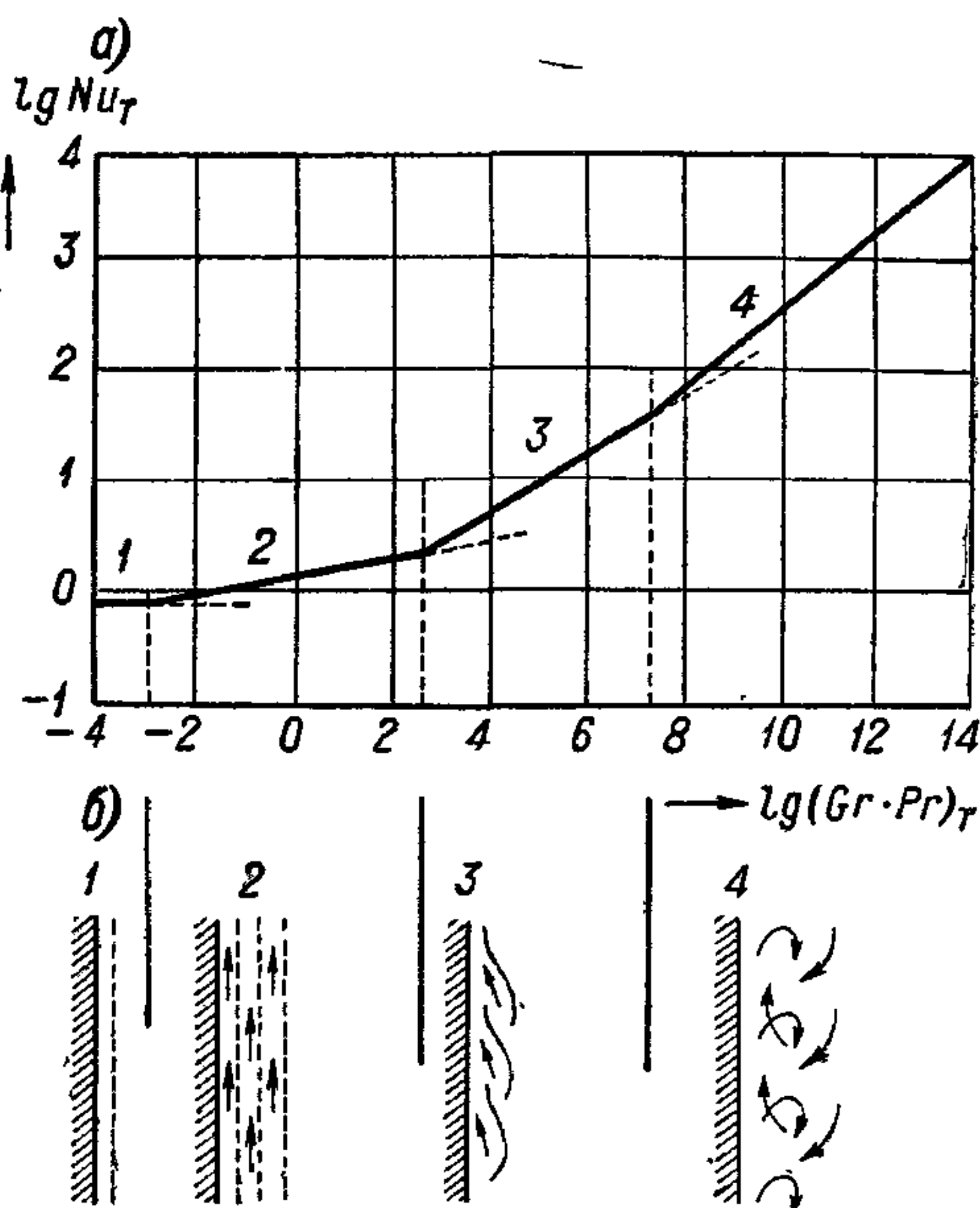


Рис. 130. К определению коэффициента теплоотдачи: а — графическое выражение обобщенной критериальной формулы; б — схемы основных режимов движения воздуха.

1 — пленочный; 2 — слоистый; 3 — локонообразный; 4 — вихревой.

Значения коэффициентов c и n в этом уравнении для разных участков и величины произведения $Gr \cdot Pr$, определяющие пределы участков, показаны в табл. 10.

Таблица 10

Характеристики критериального уравнения теплоотдачи для четырех его участков

Участки	$Gr \cdot Pr$	c	n	α_k	Режим движения воздуха
1	$1 \cdot 10^{-4} \text{—} 1 \cdot 10^{-3}$	0,5	0	$0,5 \frac{l}{\lambda}$	Пленочный
2	$1 \cdot 10^{-3} \text{—} 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125	$A_1 \left(\frac{\Delta t}{l^5} \right)^{0,125}$	Слоистый
3	$5 \cdot 10^2 \text{—} 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25	$A_2 \left(\frac{\Delta t}{l} \right)^{0,25}$	Локонообразный
4	$2 \cdot 10^7 \text{—} 1 \cdot 10^{13}$	0,135	0,333	$A_3 \Delta t^{0,333}$	Вихревой

Подставив в общее уравнение (190) значения критериев Нуссельта и Грасгофа по выражениям (187) и (184) и решая относительно α_k , получаем общее выражение для нахождения коэффициента теплоотдачи, обусловленного конвекцией:

$$\alpha_k = c (\beta g Pr_T)^n \cdot \frac{\gamma_T}{v_T^{2n}} \left(\frac{\Delta t}{\frac{1}{l^n} - 3} \right)^n. \tag{191}$$

Вид этого уравнения для каждого из четырех участков показан в предпоследнем столбце табл. 10. Величина коэффициентов A , входящих в уравнения для отдельных участков, при различных температурах имеет значения следующего порядка (в случае охлаждения воздухом):

Участок	A	Определяющая температура, °C (формула 189)			
		0	50	100	200
Второй	A_1	0,25	0,27	0,28	0,31
Третий	A_2	1,19	1,18	1,17	1,15
Четвертый	A_3	1,48	1,40	1,38	1,21

По этим уравнениям величина α_k получается в $\text{ккал/ч} \times \text{м}^2 \cdot \text{град}$, если l — в м, Δt — в °C и λ — в $\text{ккал/ч} \cdot \text{м} \cdot \text{град}$. Для того чтобы перевести найденное значение α_k в обычные для электротехники единицы: $\text{вт/см}^2 \cdot \text{град}$, надо его умножить на $1,16 \cdot 10^{-4}$.

Чтобы выбрать для какого-либо конкретного случая одну из формул для вычисления α_k , соответствующую одному из четырех участков, надо вычислить для этого случая значение $Gr \cdot Pr$ и

по табл. 10 установить, какому участку это значение соответствует. При охлаждении воздухом можно принять: $Pr = 0,72$. При вычислении Gr по формуле (184) берутся значения: $\beta = 1/273 \text{ град}^{-1}$ и $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$. Значения кинематической вязкости ν при заданном значении определяющей температуры t_t можно найти, пользуясь следующей табличкой:

Температура, °C	$\nu \times 10^6, \text{ м}^2/\text{сек}$	Температура, °C	$\nu \times 10^6, \text{ м}^2/\text{сек}$	Температура, °C	$\nu \times 10^6, \text{ м}^2/\text{сек}$	Температура, °C	$\nu \times 10^6, \text{ м}^2/\text{сек}$
-60	9	+20	16	100	24	180	33,5
-40	10	+40	17,5	120	26	200	36
-20	12	+60	19,5	140	28,5	220	38
-0	14	+80	22	160	31	240	40

Определяющий размер l представляет собой высоту корпуса конденсатора или диаметр цилиндрического конденсатора, если последний расположен горизонтально. Величину перегрева на поверхности корпуса $\Delta t = t_k - t_o$ приходится оценивать ориентировочно, с последующим уточнением.

В большинстве случаев при расчете конденсаторов приходится иметь дело с третьим участком кривой рис. 130, а. Принимая для уравнения этого участка (табл. 10) значение $A = 1,18$ и вводя коэффициент $1,16 \cdot 10^{-4}$ для перехода в обычные единицы, находим выражение для вычисления коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_k = 1,37 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\Delta t}{l} \right)^{0,25}, \quad (192)$$

где l — в м, Δt — в °C и α_k — в $\text{вт/см}^2 \cdot \text{град}$. В старых курсах теплотехники для горизонтальных плит (или поверхности теплоотдачи, обращенной вверх) приводится эмпирическая формула

$$\alpha_k = 2,5 \cdot 10^{-4} \Delta t^{0,25}. \quad (193)$$

Этой формулой можно воспользоваться, если возникает необходимость учесть теплоотдачу с крышки конденсатора, которой обычно пренебрегают.

Для вертикально расположенных цилиндров была предложена формула

$$\alpha_k = 5,88 \cdot 10^{-4} \beta \left(\frac{\Delta t}{D} \right)^{0,25}. \quad (194)$$

Здесь D — диаметр корпуса конденсатора в мм, Δt — в °C и β — коэффициент, зависящий от высоты цилиндра H . При $H \geq 500 \text{ мм}$ $\beta = 1$; при $H = 500 \text{ мм}$ $\beta = 1,01$; при $H = 300 \text{ мм}$ $\beta = 1,07$; при $H = 200 \text{ мм}$ $\beta = 1,25$; при $H < 200 \text{ мм}$ значение β можно вычислить по формуле

$$\lg \beta = 1,51 - 0,615 \lg H, \quad (195)$$

где H — в мм. Значение α_k по формулам (193) и (194) получается в $вт/см^2 \cdot град$. Поскольку формула (194) учитывает как высоту, так и диаметр цилиндра, она должна давать лучшие результаты, чем общая формула (192), при расчете цилиндрических вертикально расположенных конденсаторов.

Значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{и}$, обусловленного теплоизлучением, можно найти по формуле, основанной на законе Стефана — Больцмана:

$$\alpha_{и} = \frac{5,75k_{и}}{\Delta t} \left[\left(\frac{273 + t_k}{1000} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_0}{1000} \right)^4 \right], \quad (196)$$

где $\Delta t = t_k - t_0$ в $^{\circ}C$ и $k_{и}$ — коэффициент, характеризующий лучеиспускательную способность корпуса конденсатора и зависящий от материала корпуса и характера его поверхности. Значение $\alpha_{и}$ по формуле (196) получается в $вт/см^2 \cdot град$. Значения $k_{и}$ для ряда материалов приведены в таблице, ниже.

Для ориентировки укажем, что при $k_{и} = 1$ и $t_0 = 20^{\circ}C$ коэффициент $\alpha_{и} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ вт/см}^2 \cdot град$ при $\Delta t = 20^{\circ}C$ и $\alpha_{и} = 9 \cdot 10^{-4} \text{ вт/см}^2 \cdot град$ при $\Delta t = 100^{\circ}C$.

Материал излучающей поверхности	Коэффициент излучения $k_{и}$	Материал излучающей поверхности	Коэффициент излучения $k_{и}$
Абсолютно черное тело . .	1,00	Железо полированное .	0,23
Фарфор глазурованный . .	0,96	Латунь полированная . .	0,17
Стекло обыкновенное . . .	0,90	Жесть	0,043—0,064
Черный лак по железу . .	0,87—0,90	Алюминий шероховатый	0,055
Железо окисленное, медь		Алюминий полирован-	
окисленная	0,74	пый	0,05
Серая краска по жести . .	0,60	Серебро полированное .	0,03
Алюминиевая краска . . .	0,43		

Суммируя вычисленные значения α_k и $\alpha_{и}$, находим общее значение коэффициента теплоотдачи α_T [см. формулу (183)]. Опытное исследование коэффициента теплоотдачи при естественном воздушном охлаждении для обычных размеров радиоконденсаторов показало, что как при цилиндрических, так и при прямоугольных корпусах наблюдается закономерная зависимость α_T от боковой поверхности конденсатора (рис. 131). При значениях площади боковой поверхности порядка 200 см^2 и выше величина α_T близка к обычно применяемому значению $1 \cdot 10^{-3} \text{ вт/см}^2 \cdot град$; при меньших размерах конденсаторов α_T заметно возрастает.

При использовании кривых рис. 131 для других значений перегрева на поверхности корпуса можно вести пересчет от значения Δt_1 к значению Δt_2 , пользуясь формулой

$$\alpha_{T_2} = \alpha_{T_1} \left(\frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \right)^{0,25}, \quad (197)$$

которая получена в предположении, что зависимость $\alpha_{\text{н}}$ от температуры близка к характеру зависимости $\alpha_{\text{к}} = f(t)$ и что обычно $\alpha_{\text{н}} < \alpha_{\text{к}}$.

Для силовых конденсаторов с высотой корпуса 350 мм была получена эмпирическая формула (для пределов $\Delta t_{\text{к}} = 5 - 20^\circ \text{C}$):

$$\alpha_{\text{т}} = (9,5 + 0,39\Delta t_{\text{к}}) \cdot 10^{-4} [\text{вт/см}^2 \cdot \text{град}]. \quad (198)$$

Данные рис. 131 и формулы (198) соответствуют вычислениям, при которых за поверхность охлаждения S принимается только боковая поверхность, а теплоотдача от дна и крышки конденсатора не учитывается.

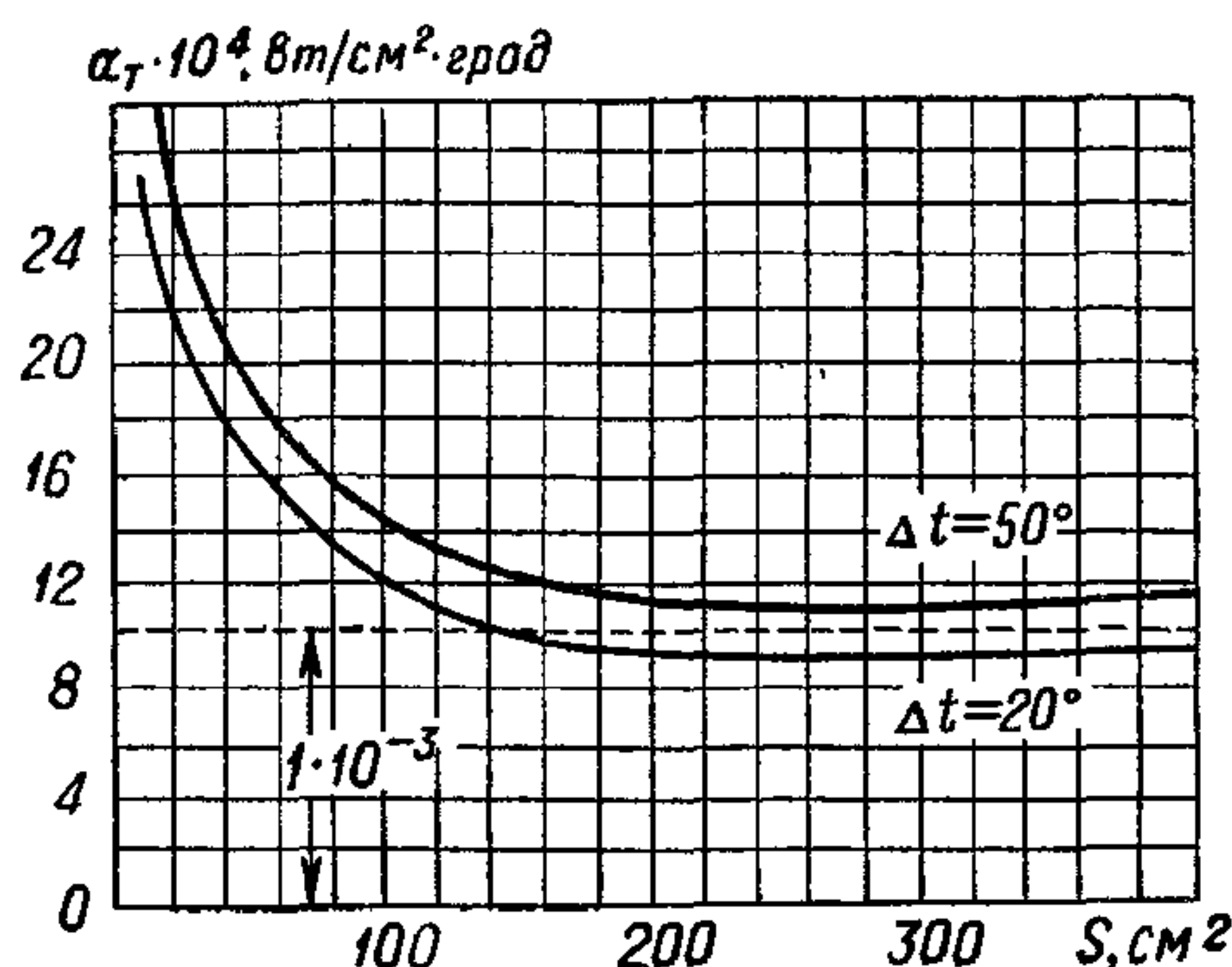


Рис. 131. Зависимость полного коэффициента теплоотдачи от величины боковой поверхности корпуса для двух значений температуры перегрева на поверхности корпуса при естественном воздушном охлаждении.

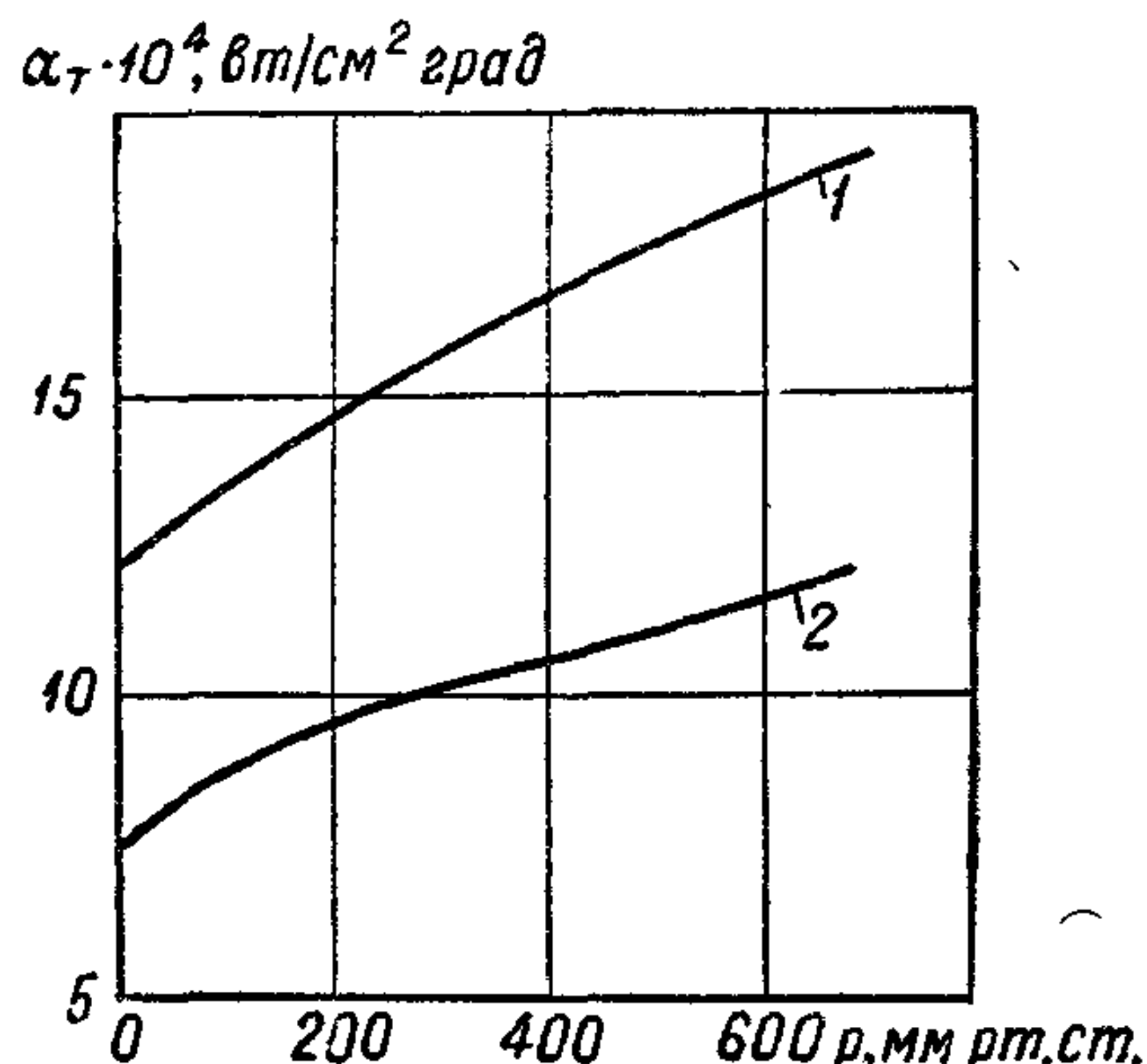


Рис. 132. Зависимость коэффициента теплоотдачи от давления воздуха.

1 — корпус из полиуретана, $\Phi 26 \times 39 \text{ мм}$, рассеиваемая мощность 2 вт; 2 — корпус из алюминия, $\Phi 34 \times 74 \text{ мм}$, рассеиваемая мощность 1,5 вт.

При вычислениях $\Delta t_{\text{к}}$ по формуле (107) возникает затруднение в связи с тем, что величина $\alpha_{\text{т}}$ сама зависит от температуры. Если можно пренебречь теплоизлучением, т. е. принять $\alpha_{\text{т}} \approx \alpha_{\text{к}}$, то, подставляя в формулу (107) значение $\alpha_{\text{к}}$ по формуле (192) и решая относительно $\Delta t_{\text{к}}$, получим:

$$\Delta t_{\text{к}} = \left(7,3 \cdot 10^3 P_{\text{Р}} \text{tg} \delta \frac{\sqrt[4]{l}}{S} \right)^{0,8}, \quad (199)$$

где $P_{\text{Р}}$ — в ватт, S — в см^2 и l — высота корпуса в м.

Для цилиндрических конденсаторов можно сделать аналогичное преобразование, используя формулу (194) вместо (192).

Приведенные данные о величине $\alpha_{\text{т}}$ соответствуют нормальному давлению окружающего воздуха. При использовании конденсаторов в электронном оборудовании высотных самолетов надо учитывать снижение давления воздуха с высотой над уровнем моря. При этом составляющая $\alpha_{\text{к}}$ будет снижаться и общее значение $\alpha_{\text{т}}$

будет уменьшаться при снижении давления воздуха (рис. 132). В условиях космоса следует принимать $\alpha_T \approx \alpha_H$, так как $\alpha_K \approx 0$.

При значительном тепловыделении в конденсаторе, в частности при его работе в мощных высокочастотных устройствах, величина допускаемого рабочего напряжения $U_{\text{раб}}$ может определяться не соображениями об электрической прочности диэлектрика, а допустимой температурой нагрева конденсатора и условиями теплоотдачи. Приравнивая значения активной мощности [формулы (106) и (87)] и решая полученное уравнение относительно U , получаем выражение для допускаемого рабочего напряжения с учетом условий нагрева:

$$U_{\text{раб}} = \sqrt{\frac{\alpha_T S \Delta t_K}{\omega C \operatorname{tg} \delta}}. \quad (200)$$

Здесь $U_{\text{раб}}$ — в в, C — в ф, S — в см², α_T в вт/см² · град и $\omega = 2\pi f$ (где f — в гц), Δt_K — допускаемое значение перегрева на поверхности корпуса, выбранное из соображений о нагревостойкости диэлектрика, о недопустимости резкого ухудшения его электрических свойств с температурой с учетом влияния температуры на скорость процесса старения, а иногда и из соображений о влиянии нагрева конденсатора на окружающие его другие детали аппаратуры.

Формула (200) показывает, что в этом случае повышение допускаемого напряжения можно получить, увеличивая поверхность охлаждения конденсатора или величину коэффициента теплоотдачи. При этом пропорционально квадрату напряжения возрастает и допускаемая реактивная мощность.

§ 48. Форсированное охлаждение конденсаторов

Усиление теплоотдачи с поверхности конденсатора можно получить, увеличивая поверхность охлаждения S путем приварки ребер (радиаторов) к боковым стенкам корпуса (рис. 133). Увеличение теплоотдачи происходит при этом примерно пропорционально возрастанию охлаждающей поверхности.

Увеличенное значение поверхности охлаждения S_p после оребрения будет составлять

$$S_p = 2H (B + L + Nb), \quad (201)$$

где N — общее число ребер, b — ширина ребра; L — длина корпуса, H — его высота (размеры в см).

Ширину ребра нельзя брать очень большой, так как с увеличением b снижается температура перегрева θ_2 на конце ребра по сравнению с температурой θ_1 у основания ребра, равной температуре перегрева поверхности корпуса; в связи с этим теплоотдача с ребра будет уменьшаться с ростом его ширины.

Если пренебречь теплоотдачей с концов ребер, то зависимость отношения θ_1/θ_2 от ширины ребра может быть выражена формулой

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} \approx \frac{1}{\operatorname{ch} b \sqrt{\frac{2\alpha_T}{\lambda\delta}}}, \quad (202)$$

где α_T — коэффициент теплоотдачи в $\text{ккал/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{град}$, λ — коэффициент теплопроводности материала ребер в $\text{ккал/ч} \cdot \text{град}$, δ — толщина и b — ширина ребра в м.

Гиперболический косинус растет с увеличением аргумента, поэтому с увеличением b отношение θ_2/θ_1 будет

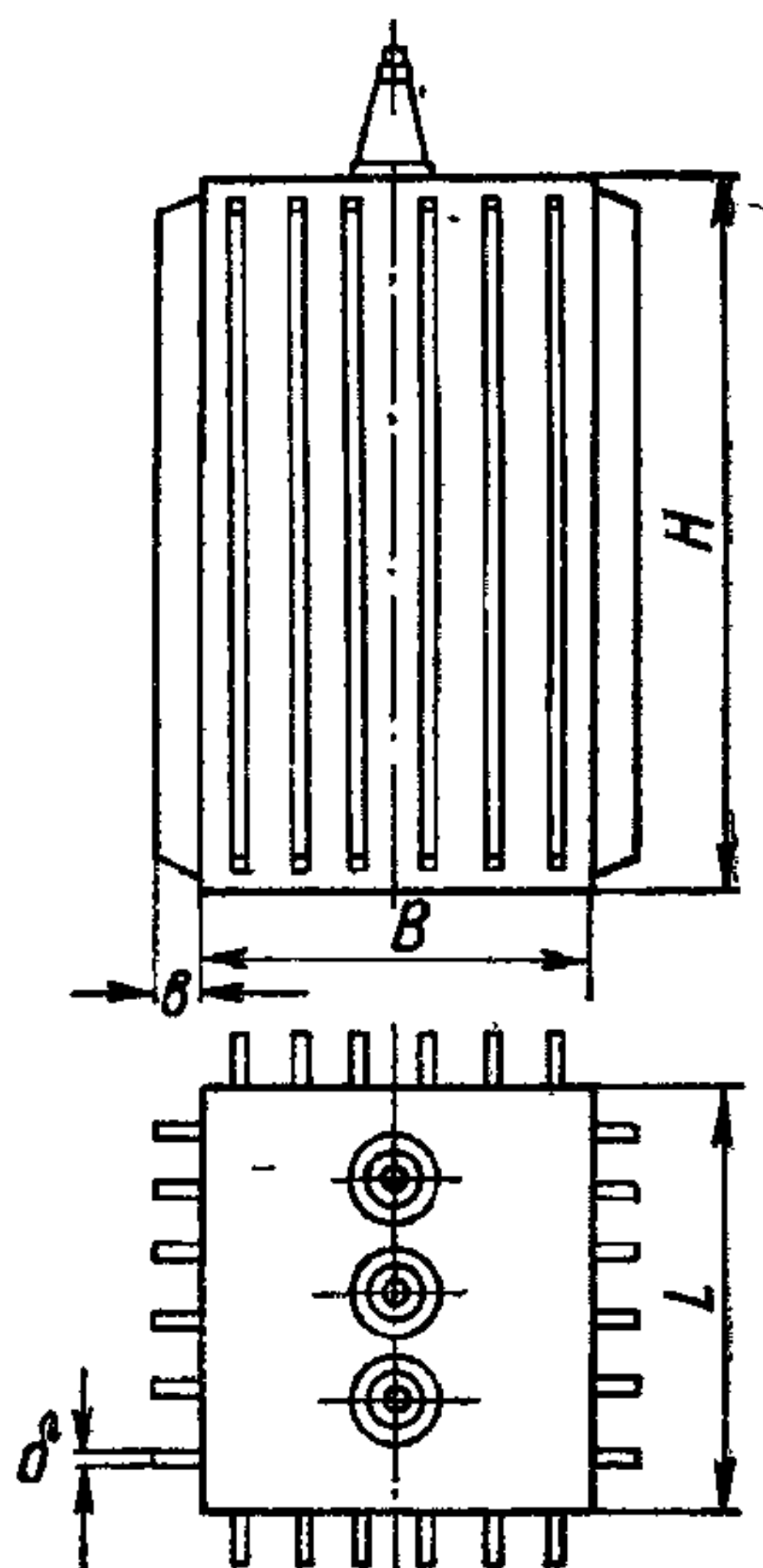


Рис. 133. Форсированное охлаждение конденсатора с помощью приварки ребер к боковым стенкам корпуса.

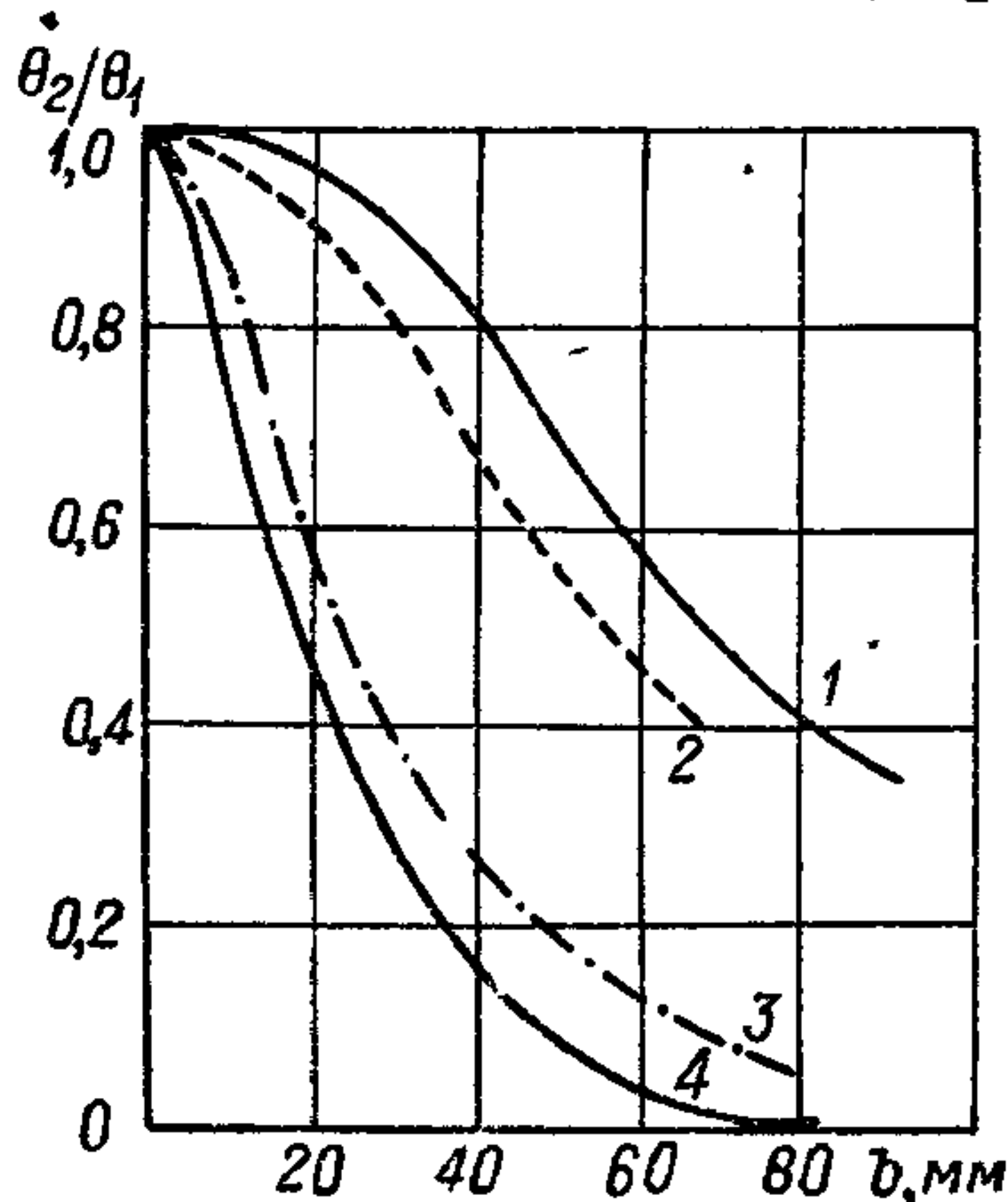


Рис. 134. Зависимость отношения температуры на вершине ребра к температуре у его основания.

1 — при $\alpha = 8,63 \text{ ккал/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{град}$;
2, 3, 4 — при $\alpha = 100 \text{ ккал/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{град}$
(1 и 4 — сталь, 2 — медь, 3 — латунь).

падать; степень падения усиливается с уменьшением теплопроводности ребра λ , с уменьшением его толщины δ и с увеличением коэффициента теплоотдачи α_T (рис. 134). Для стальных ребер можно применять значения $b = 40 \div 60 \text{ мм}$ при естественном охлаждении, т. е. при $\alpha_T \approx 1 \cdot 10^{-3} \text{ вт/см}^2 \cdot \text{град}$ ($8,63 \text{ ккал/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{град}$). При этом оребрение дает возможность увеличить поверхность охлаждения до 2—2,5 раз, получая увеличение теплоотдачи примерно только в 2 раза. Для усиления теплоотдачи можно соединить оребрение с принудительной продувкой воздуха между ребрами, т. е. с форсированным воздушным охлаждением. При этом повышается α_T и надо сократить ширину ребер b или применить для их изготовления материал с большей теплопроводностью. При скоростях движения воздуха порядка 5—10 м/сек ($\alpha_T \approx 20 \div 30 \text{ ккал/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{град}$) надо применять медные ребра.

Зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости воздуха v (м/сек) определяется по эмпирической формуле

$$\alpha_T = 5,2v^{0,8} \text{ [ккал/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{град]}. \quad (203)$$

Для расчета форсированного воздушного охлаждения с применением ребер в случае конденсаторов цилиндрического типа, например керамических, можно использовать методику расчета, разработанную для охлаждения анодов мощных радиоламп.¹ В тех случаях, когда крепление металлических ребер неудобно осуществить, например в случае вакуумных конденсаторов, форсированное воздушное охлаждение применяют и без оребрения, получая уве-

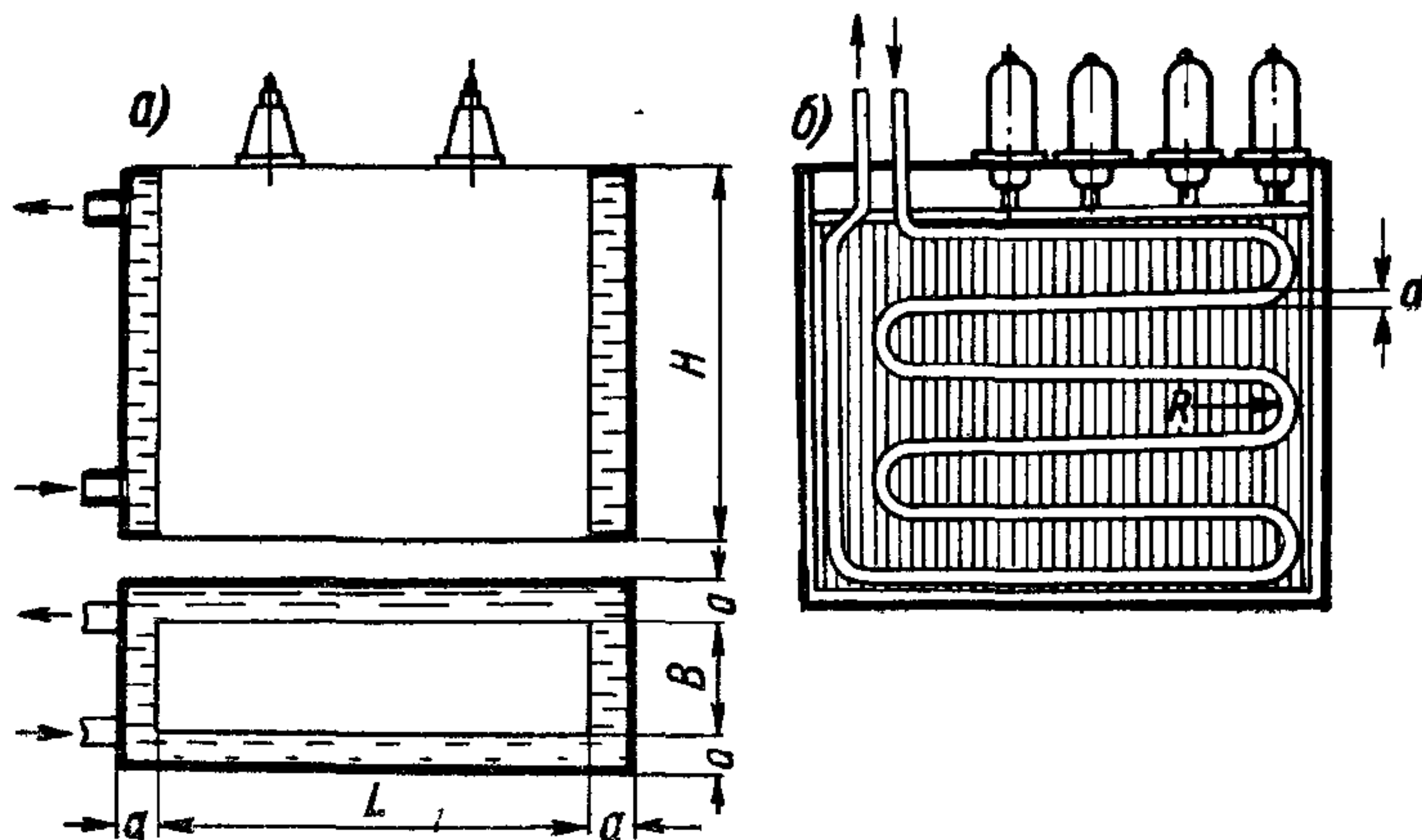


Рис. 135. К расчету водяного охлаждения конденсаторов: а — охлаждение внешней водяной рубашкой; б — охлаждение внутренним змеевиком.

личение допускаемого тока нагрузки до 2 раз (увеличение реактивной мощности до 4 раз).

Эффективным средством для снижения температуры перегрева конденсаторов и увеличения допускаемого значения рабочего напряжения (или тока) и реактивной мощности является применение водяного охлаждения. Для этой цели применяют наружную водяную рубашку (рис. 135, а) или змеевик, вводимый внутрь конденсатора (рис. 135, б). При охлаждении с помощью водяной рубашки вода входит в нижнюю часть зазора между стенками и поднимается вверх, омывая нагретые внутренние стенки. В этом случае для определения коэффициента теплоотдачи можно воспользоваться выражением (204) для стенки, омываемой потоком жидкости,двигающимся с определенной скоростью v_B :

$$\alpha_T = Nu \frac{\lambda_B}{l} \text{ [ккал/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{град]}, \quad (204)$$

¹ П. А. Остряков, Н. В. Зарянов. Теплоотводящие устройства мощных радиостанций. Связьиздат, 1954.

где Nu — критерий Нуссельта, l — определяющий размер в m (в нашем случае высота корпуса H) и λ_v — коэффициент теплопроводности воды в $ккал/ч \cdot m \cdot град$. Величину λ_v надо выбрать в соответствии с температурой воды t_v по табл. 11.

Таблица 11

Некоторые характеристики воды к расчету водяного охлаждения

Температура воды, °C	0	10	20	30	40	50
$\gamma, кг/м^3$	999,8	999,6	998,2	995,6	992,2	988,0
$c_v, кал/кг \cdot град$	1012	1006	1004	1003	1003	1003
$a_v, м^2/ч, \times 10^4$	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5	5,6
$\lambda_v, ккал/ч \cdot м \cdot град$	0,474	0,494	0,515	0,531	0,545	0,557
$\nu_v, м^2/сек, \times 10^6$	1,79	1,30	1,00	0,805	0,659	0,556
Pr	13,7	9,56	7,06	5,50	4,30	3,56

Примечание. Для обычных расчетов принимают значения при 20° C.

Для определения величины критерия Нуссельта используется критериальное уравнение

$$Nu = 0,0356 Re^{0,8} Pr^{0,4}, \tag{205}$$

Значение критерия Прандтля Pr для воды можно взять по табл. 11, значение критерия Рейнольдса Re вычисляется по формуле

$$Re = \frac{v_v l}{\nu_v}, \tag{206}$$

где v_v — скорость воды в $м/сек$, l — определяющий размер в $м$ (т. е. H) и ν_v — кинематическая вязкость воды (табл. 11).

Для определения необходимой скорости воды можно принять, что все количество тепла, выделяемое конденсатором, передается охлаждающей воде:

$$Q = 0,24 P_A = v_v F \gamma c_v \Delta t_v. \tag{207}$$

Здесь Q — количество тепла в $ккал/сек$, P_A — активная мощность потерь в конденсаторе в $вт$ [по формуле (106)], v_v — скорость воды в $м/сек$, γ — удельный вес воды (табл. 11, ориентировочно $\gamma = 1000 кг/м^3$), Δt_v — разность температур воды при входе и выходе из конденсатора, c_v — теплоемкость воды (табл. 11, ориентировочно $c_v = 1000 ккал/кг \cdot град$). Величину F — сечение потока воды в охлаждающей рубашке (применительно к рис. 135, а) — находим по формуле

$$F = 2a (L + B + 2a) [м^2]. \tag{208}$$

Здесь расстояние между двойными стенками a надо выбирать с учетом того, что от величины a будет зависеть скорость воды, а следовательно, и величина α_t .

Из выражения (207) находим:

$$v_B = \frac{0,24 P_A}{F \gamma c_B \Delta t_B}. \quad (209)$$

Ориентировочно можно принять $\Delta t_B \approx 5^\circ \text{C}$ (обычно не выше 10°C). Вычислив v_B по формуле (209), находим значение критерия Рейнольдса по уравнению (206) и вычисляем критерий Нуссельта по (205); далее находим искомое значение коэффициента теплоотдачи по формуле (204).

Значение перегрева на поверхности корпуса конденсатора (на внутренней стенке) Δt_K находим по формуле (88), в которую вместо t_o надо подставить t_B . В этой формуле P_A — в *вт* и α_T — в *вт/см² · град*. Для перевода в эти единицы надо значение α_T , вычисленное по формуле (204), умножить на $1,16 \cdot 10^{-4}$. Поверхность охлаждения, применительно к рис. 135, а, будет равна

$$S = 2H(L + B) [\text{см}^2]. \quad (210)$$

Определив Δt_K и зная t_B , находим t_K и сравниваем его с допускаемым для данного типа конденсаторов значением $t_{\text{доп}}$. Если получится $t_K > t_{\text{доп}}$, необходимо увеличить скорость воды и тем повысить α_T и снизить t_K . Для ориентировки можно указать, что в бумажно-масляных конденсаторах типа ПМВ с водяным охлаждением данного типа средний расход воды составлял около 3,5 л/мин или $6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{сек}$; при сечении водяного потока порядка 50—100 см² это соответствует скорости воды порядка $(6 \div 10) \times 10^{-3} \text{ м/сек}$.

В случае охлаждения с помощью змеевика (рис. 135, б) при определении коэффициента теплоотдачи α_T можно воспользоваться формулой (212) для прямой трубы, выведенной из критериального уравнения (211), с последующим введением поправки для учета наличия закруглений в змеевике.

Критериальное уравнение для теплоотдачи в прямой трубе при вихревом (турбулентном) движении имеет вид:

$$\text{Nu} = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4}. \quad (211)$$

Критерий Прандтля берется по табл. 11, а критерий Рейнольдса вычисляется по формуле (206), но в качестве определяющего размера l берется уже не H , как ранее, а диаметр трубы d , также в м.

Вычислив Nu , находим α_T по формуле

$$\alpha_T = \text{Nu} \frac{\lambda_B}{d} \left(1 + 1,77 \frac{d}{R} \right) [\text{ккал/ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{град}]. \quad (212)$$

Здесь λ_B — коэффициент теплопроводности воды в *ккал/ч · м · град* берется по табл. 11, d — диаметр трубы (змеевика) в м и R — радиус змеевика в м. (Выражение в правой части формулы (212), взятое в скобки, дает поправку на наличие закруглений в змеевике). Скорость воды v_B можно найти по формуле (209), подстав-

ляя в нее $F = \frac{\pi d^2}{4}$ в m^2 . Уравнением (211) можно пользоваться, когда скорость движения воды больше критической:

$$v_{кр} = 2200 \frac{v_B}{d} [м/сек]. \quad (213)$$

При $v_B < v_{кр}$ имеем случай слоистого (ламинарного) движения. Для него критериальное уравнение имеет вид:

$$Nu = 0,74 Re_T^{0,2} (Gr \cdot Pr)^{0,1} Pr_T^{0,2}. \quad (214)$$

Индекс «т» указывает, что в этом случае при вычислении критериев надо пользоваться не температурой воды t_B , а средним значением температуры пограничного слоя: $t_T = 0,5 (t_K + t_B)$. Для определения коэффициента теплоотдачи и в этом случае можно пользоваться формулой (204), находя λ_B при температуре t_T и вместо l подставляя d .

Найдя величину α_T для определения t_K — температуры поверхности конденсатора, прилегающей к змеевику, можно использовать уравнение (88), подставляя значение поверхности охлаждения S , равное поверхности змеевика:

$$S = \pi d L [см^2], \quad (215)$$

где d — диаметр и L — полная длина змеевика.

Применение водяного охлаждения является весьма эффективным средством снижения температуры конденсатора. Современная практика конденсаторостроения преимущественно применяет охлаждение змеевиком. Применение водяного охлаждения конденсаторов, особенно удобно при их использовании в высокочастотных электротермических установках, где уже имеется система водяного охлаждения для индуктора и мощных радиоламп.

Следует иметь в виду, что при перерыве в подаче воды температура водоохлаждаемого конденсатора может возрасти в 10—20 раз, что приведет к гибели конденсатора. Поэтому должно быть предусмотрено автоматически действующее устройство, отключающее конденсаторы при перерывах в подаче воды. Аналогичное устройство надо предусматривать и при форсированном охлаждении конденсаторов с помощью вентиляторов.

§ 49. Максимальная температура внутри конденсатора

До сих пор мы рассматривали нагрев конденсатора, характеризуя его температурой на поверхности корпуса (на наружной поверхности конденсатора). Между тем конденсаторные секции могут быть отделены от стенок корпуса слоем изоляции с малой теплопроводностью (электрическая изоляция от корпуса, заливочная масса для защиты от влажности). Кроме того, если корпус изготовлен не из металла, а из электроизолирующего материала (пластмассы, керамики, стекла), то стенка корпуса также будет создавать зна-

чительное тепловое сопротивление на пути теплового потока, движущегося от поверхности секций конденсатора к его наружной поверхности. В связи с этим температура на поверхности конденсаторной секции (или пакета секций) t_c может заметно превышать температуру на поверхности корпуса t_k , которую мы определяли в предыдущих параграфах исходя из условий внешнего охлаждения. В общем случае, когда на пути теплового потока от секций конденсатора к его наружной поверхности имеется несколько изолирующих слоев (рис. 136)

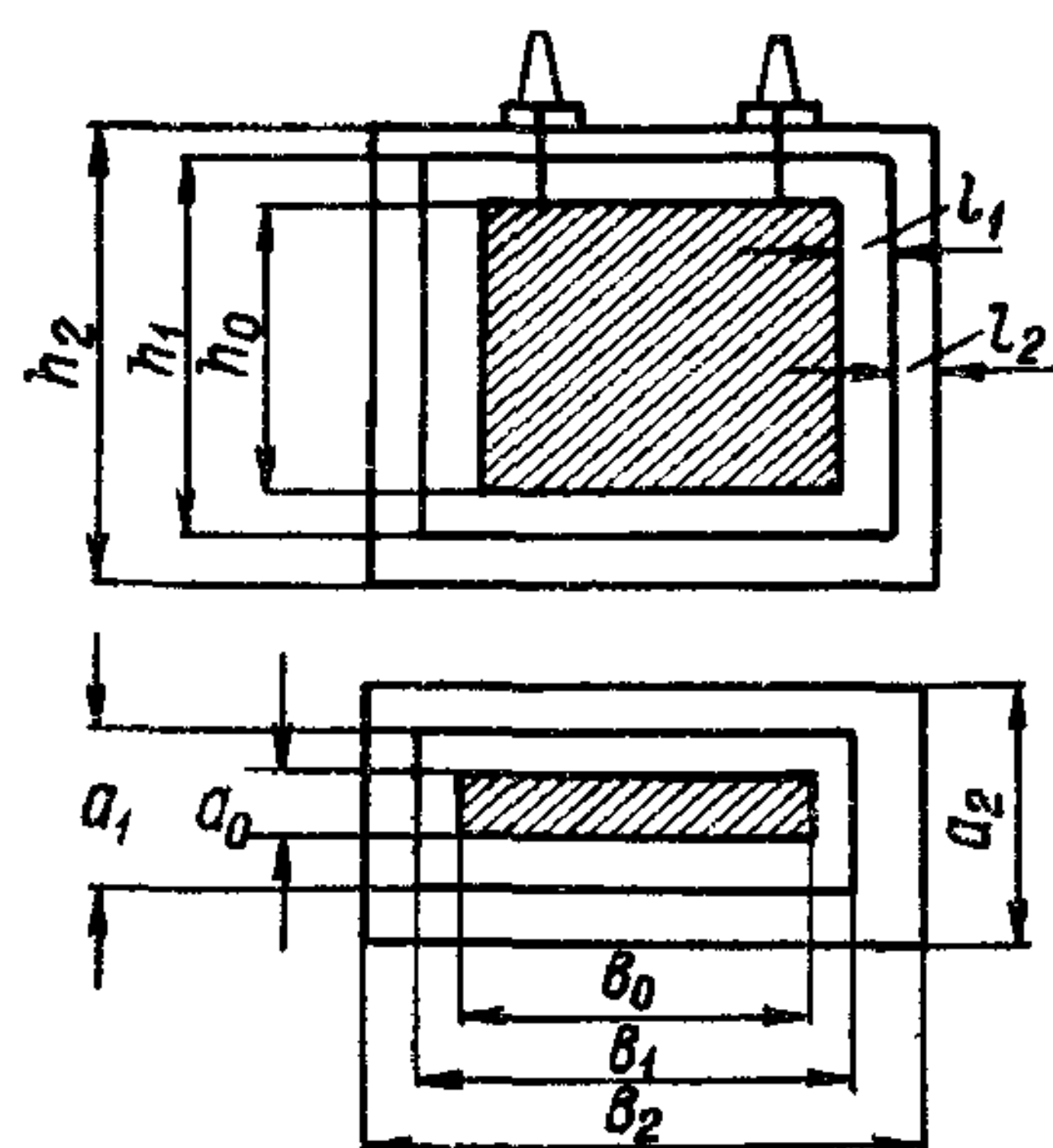


Рис. 136. К расчету температуры внутри конденсатора.

с толщиной l_1, l_2 и т.д. и коэффициентами теплопроводности λ_1, λ_2 и т.д., можно написать:

$$P_A = \frac{\Delta t_1}{\frac{l_1}{\lambda_1 S_1}} = \frac{\Delta t_2}{\frac{l_2}{\lambda_2 S_2}} = \dots \quad (216)$$

Здесь P_A — в $вт$, λ — в $вт/см \cdot град$, l — в $см$, Δt — перепад температуры в $^{\circ}C$ и средние значения сечения теплового потока S — в $см^2$.

Предполагая для упрощения, что тепловой поток распространяется от поверхности секции только к боковым стенкам корпуса, можем написать:

$$S_1 = 0,5 (h_0 + h_1) (a_0 + a_1 + b_0 + b_1);$$

$$S_2 = 0,5 (h_1 + h_2) (a_1 + a_2 + b_1 + b_2) \dots$$

Из уравнения (216) находим:

$$\Delta t_1 = \frac{P_A l_1}{\lambda_1 S_1}; \quad \Delta t_2 = \frac{P_A l_2}{\lambda_2 S_2}; \dots \quad (217)$$

Тогда температура на поверхности пакета секций будет равна:

$$t_c = t_k + \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots \quad (218)$$

Максимальная температура внутри конденсаторной секции будет превышать t_c за счет перепада температуры в самой секции. Определение этого перепада осложняется тем, что внутри секции тепло не только проводится, но и создается за счет потерь энергии в диэлектрике и обкладках.

Для некоторых типов конденсаторов эта задача была решена рядом исследователей.

По Д. М. Казарновскому, для простейшего случая плоского керамического конденсатора открытого типа с толщиной диэлектрика d максимальная температура внутри конденсатора (на расстоянии $0,5d$ от поверхности) будет равна:

$$t_{\text{макс}} = \frac{P_{\text{уд.}} d^2}{8\lambda} + t_k. \quad (219)$$

Здесь λ — коэффициент теплопроводности керамики в $\text{вт/см} \cdot \text{град}$, d — в см , t_K — температура поверхности в $^\circ\text{C}$ и $p_{\text{уд}}$ — удельные потери:

$$p_{\text{уд}} = \frac{f \varepsilon \operatorname{tg} \delta E^2}{1,8 \cdot 10^{12}} [\text{вт/см}^3], \quad (220)$$

где f — частота в гц , ε и $\operatorname{tg} \delta$ — диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь керамики, E — напряженность поля в в/см .

Если керамика опрессована слоем пластмассы, то в формулу (219) вместо t_K надо подставить t_c из формулы (218), подсчитав Δt_1

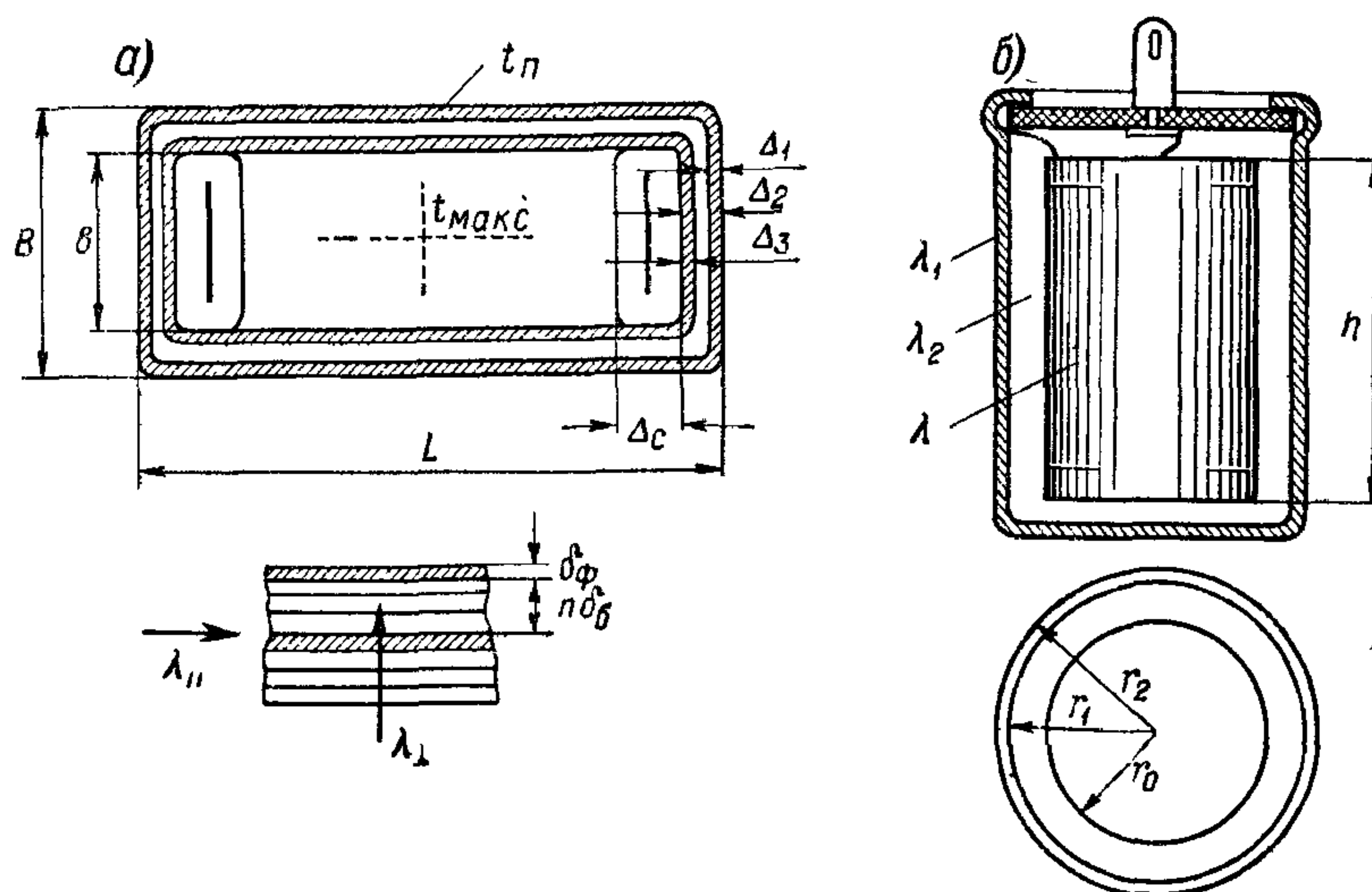


Рис. 137. К расчету максимальной температуры конденсатора: а — бумажномасляный конденсатор; б — электролитический конденсатор.

по выражению (217), в котором значения l_1 и λ_1 будут соответствовать толщине слоя пластмассы и ее теплопроводности.

По М. И. Мантрову, для силового бумажномасляного конденсатора (рис. 137, а) разность между максимальной температурой $t_{\text{макс}}$ и температурой t_0 окружающей среды определяется выражением

$$t_{\text{макс}} - t_0 = \frac{kQ}{\alpha_T S} + 0,03 \gamma E^2 \left[\frac{2b\Delta_c}{\lambda_{\perp}} + \frac{(b - \Delta_c)^2}{\lambda_{\parallel}} \right]. \quad (221)$$

Здесь введены следующие обозначения: $Q = 0,24 P_A$ — количество выделяемого в конденсаторе тепла в кал/сек , где P_A — в вт , по формуле (106); α_T — коэффициент теплоотдачи с поверхности корпуса конденсатора в $\text{кал/сек} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{град}$. Если α_T задан в $\text{вт/см}^2 \cdot \text{град}$, его надо умножить на 0,24; k — коэффициент равный:

$$k = 1 + \alpha_T \left(\frac{\Delta_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta_2}{\lambda_2} + \frac{\Delta_3}{\lambda_3} \right),$$

где Δ_1 и λ_1 — толщина и коэффициент теплопроводности стенки корпуса, Δ_2 и λ_2 — то же для прослойки масла между корпусом и слоем изоляции от корпуса, а Δ_3 и λ_3 — то же для слоя изоляции от корпуса (значения Δ — в см и λ — в кал/сек·см·град; если значения λ даны в вт/см·град, их надо умножить на 0,24); S — наружная поверхность корпуса конденсатора в см² (учитывается боковая поверхность, пренебрегая теплоотдачей от дна и крышки); γ — активная проводимость диэлектрика в ом⁻¹·см⁻¹:

$$\gamma = 0,55 \cdot 10^{-12} f \varepsilon \operatorname{tg} \delta,$$

где f — в гц, а ε и $\operatorname{tg} \delta$ — диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь диэлектрика при рабочей температуре конденсатора, E — напряженность поля в диэлектрике в в/см; b — ширина конденсаторной секции в см (рис. 137, а), Δ_c — толщина конденсаторной секции в см, λ_{\perp} — теплопроводность конденсаторной секции в направлении, перпендикулярном поверхности слоев бумаги и фольги:

$$\lambda_{\perp} = \frac{\lambda_{\phi} \lambda_{\delta} (n \delta_{\delta} + \delta_{\phi})}{\lambda_{\phi} n \delta_{\delta} + \lambda_{\delta} \delta_{\phi}}; \quad (222)$$

λ_{\parallel} — теплопроводность конденсаторной секции в направлении слоев бумаги и фольги:

$$\lambda_{\parallel} = \lambda_{\delta} \frac{n \delta_{\delta}}{n \delta_{\delta} + \delta_{\phi}} + \lambda_{\phi} \frac{\delta_{\phi}}{n \delta_{\delta} + \delta_{\phi}}. \quad (223)$$

Здесь λ_{\perp} и λ_{\parallel} — в кал/сек·см·град. В формулах (222) и (223) введены обозначения: n — число слоев бумаги между обкладками; δ_{δ} — толщина одного слоя бумаги в см, δ_{ϕ} — толщина фольги в см, λ_{δ} и λ_{ϕ} — значения коэффициентов теплопроводности бумаги и фольги, соответственно, в кал/сек·см·град.

По Л. Н. Закгейму, для электролитического конденсатора в цилиндрическом корпусе (рис. 137, б) разность между максимальной температурой внутри конденсатора и температурой на поверхности корпуса составляет:

$$t_{\max} - t_{\kappa} = \frac{P_A}{2\pi h} \left(\frac{\ln r_2}{\lambda_2} + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} \ln r_1 + \frac{1}{2\lambda} - \frac{\ln r_0}{\lambda_1} \right). \quad (224)$$

Здесь

$$P_A = I_{\text{ут}} U_{-} + 2\pi f C \operatorname{tg} \delta U_{-}^2,$$

где $I_{\text{ут}}$ — ток утечки конденсатора в а, U_{-} — постоянная составляющая напряжения в в, U_{\sim} — действующее значение переменной составляющей напряжения в в, f — частота в гц, C — емкость в ф и $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла потерь, h — высота секции конденсатора в см, r_0 — радиус секции в см, r_1 — внутренний радиус корпуса в см, r_2 — наружный радиус корпуса в см, λ_1 и λ_2 — значения коэффициентов теплопроводности в вт/см·град соответственно для вещества, заполняющего зазор между секцией и стенкой корпуса

и для материала корпуса, λ — коэффициент теплопроводности материала секции (анод, катод, волокнистая прокладка, пропитанная электролитом), $\lambda \approx 0,003$ *вт/см · град*. При заливке битумом можно принять $\lambda_1 = 0,0014$ *вт/см · град*, при отсутствии заливки секции в корпусе для воздушного зазора между секцией и корпусом следует брать $\lambda_1 = 0,00022$ *вт/см · град*.

§ 50. Конденсатор при неустановившемся тепловом режиме

Выше мы рассматривали случаи, когда температура нагрева конденсатора достигала установившегося значения по истечении определенного времени с момента включения конденсатора под напряжение. При больших размерах конденсаторов это время может быть достаточно велико и исчисляется часами.

Зависимость температуры перегрева на поверхности корпуса конденсатора от времени τ с момента его включения может быть выражена уравнением

$$\Delta t = \Delta t_y \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right). \quad (225)$$

Здесь Δt_y — установившееся значение температуры перегрева (рис. 138) и T — тепловая постоянная времени конденсатора, определяемая тем временем, за которое температура перегрева конденсатора достигает 66,6% от установившегося значения. По П. В. Окулову¹, величина T может быть найдена из выражения

$$T = \frac{c_K G}{S \alpha_T}, \quad (226)$$

где c_K — теплоемкость конденсатора в *кал/кг · град*, G — вес в *кг*, S — поверхность охлаждения в *см²* и α_T — коэффициент теплоотдачи в *кал/сек · см² · град*.

Величина $c_K G$ определяется как сумма произведений из теплоемкостей всех материалов, использованных в конденсаторе (включая корпус) на соответствующие значения весов:

$$c_K G = \sum_{i=1}^{i=n} c_i G_i.$$

¹ П. В. Окулов, Сб. научных работ, Киевский индустриальный институт. 1935. с. 7-30.

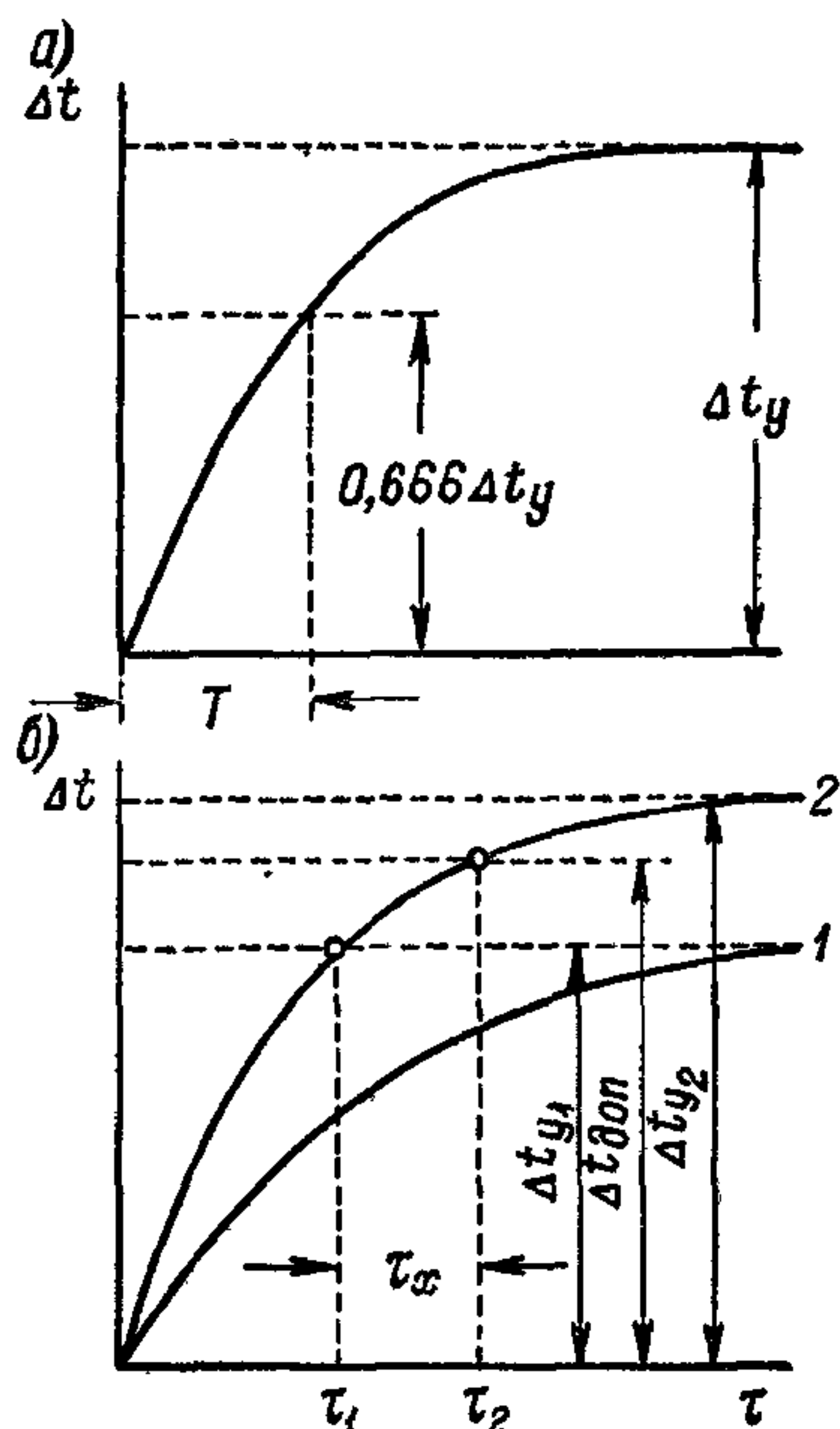


Рис. 138. Конденсатор при установившемся тепловом режиме: а — общий характер зависимости температуры перегрева от времени; б — сравнение кривых нагрева конденсатора при двух режимах работы. 1 — мощность P_1 ; 2 — мощность P_2 больше P_1 .

Зная величину тепловой постоянной времени T и величину Δt_y , можно, пользуясь расчетом, построить кривую нагрева конденсатора. Практически такие кривые обычно строятся на основе данных опыта.

Знание подобных кривых позволяет определять допустимую кратковременную перегрузку конденсатора. Предположим, что некоторое время конденсатор работал с недогрузкой при мощности P_1 ниже номинальной. В этом случае была достигнута установившаяся температура перегрева Δt_{y1} , лежащая ниже допустимой, а потому в течение времени τ_x будет возможна перегрузка мощностью P_2 до тех пор, пока не будет достигнуто предельное допустимое значение температуры перегрева $\Delta t_{\text{доп}}$. На рис. 138, б кривая 1 соответствует работе конденсатора при мощности P_1 , а кривая 2 — при мощности P_2 . Точка А на кривой 2 соответствует моменту времени τ_1 и перегреву Δt_{y1} . Для этой точки можно написать:

$$\Delta t_{y1} = \Delta t_{y2} \left(1 - e^{-\frac{\tau_1}{T}} \right).$$

Преобразовывая это уравнение получаем:

$$\Delta t_{y2} - \Delta t_{y1} = \Delta t_{y2} e^{-\frac{\tau_1}{T}} \quad \text{и}$$

$$\ln (\Delta t_{y2} - \Delta t_{y1}) = \ln \Delta t_{y2} - \frac{\tau_1}{T},$$

откуда время τ_1 будет равно:

$$\tau_1 = T \ln \Delta t_{y2} - T \ln (\Delta t_{y2} - \Delta t_{y1}). \quad (227)$$

Аналогично для точки В на кривой 2, соответствующей моменту времени τ_2 и допускаемому значению температуры перегрева $\Delta t_{\text{доп}}$, получаем:

$$\Delta t_{\text{доп}} = \Delta t_{y2} \left(1 - e^{-\frac{\tau_2}{T}} \right)$$

$$\text{и } \tau_2 = T \ln \Delta t_{y2} - T \ln (\Delta t_{y2} - \Delta t_{\text{доп}}). \quad (228)$$

Вычитая (227) и (228), находим время τ_x , в течение которого допустима перегрузка мощностью P_2 :

$$\tau_x = \tau_2 - \tau_1 = T \ln \frac{\Delta t_{y2} - \Delta t_{y1}}{\Delta t_{y2} - \Delta t_{\text{доп}}}. \quad (229)$$

При установившемся тепловом состоянии можно считать температуру перегрева пропорциональной мощности конденсатора; поэтому можно написать:

$$\tau_x = T \ln \frac{k_2 - k_1}{k_2 - k_{\text{доп}}}, \quad (230)$$

где k_1 — коэффициент загрузки конденсатора до возникновения перегрузки, k_2 — коэффициент перегрузки по мощности, $k_{\text{доп}}$ —

длительно допускаемый коэффициент перегрузки, соответствующий мощности при напряжении на 10% выше номинального ($k_{дсп} = 1,21$).

Снижение температуры выключенного конденсатора должно изменяться по закону

$$\Delta t = \Delta t_y e^{-\frac{\tau}{T}}, \quad (231)$$

где T — тепловая постоянная времени в сек.

Глава IX

УДЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДЕНСАТОРОВ

§ 51. Удельная емкость и удельный заряд

Для оценки качества конденсаторов и правильности выполнения их расчета и конструирования используют удельные характеристики, представляющие собой отношение одной из основных характеристик конденсатора к его объему или весу. Основными удельными характеристиками конденсаторов низкого напряжения являются удельная емкость $c_{уд}$ или удельный заряд $q_{уд}$. Иногда применяется также величина обратная удельной емкости — удельный объем $v'_{уд}$, рассчитанный на единицу емкости $v'_{уд}/c_{уд}$.

Для простейшего случая плоского конденсатора, учитывая только активный объем диэлектрика V и используя формулу (2), получим:

$$c_{уд} = \frac{C}{V} = \frac{0,0884\epsilon S}{Sdd} = 0,0884 \frac{\epsilon}{d^2} \text{ [нф/см}^3\text{]}, \quad (232)$$

где d — толщина диэлектрика в см. Если подставить d в мм, то:

$$c_{уд} = 8,84 \frac{\epsilon}{d^2} \text{ [мкф/см}^3\text{]}. \quad (233)$$

Полученные выражения показывают, что для получения максимальных значений удельной емкости нужно применять диэлектрики с максимальной величиной ϵ и добиваться получения диэлектриков с минимальной толщиной. Конденсаторостроение использует оба эти направления. При рекордном значении $\epsilon \approx 10\,000$ (для сегнетокерамики) при толщине порядка 100 мм можно рассчитывать на получение теоретических значений $c_{уд}$ порядка 8 мкф/см³. Фактически с учетом полного объема конденсатора удается получать значения порядка 1—2 мкф/см³. Такие же практические значения можно получать, используя тонкие полимерные пленки с толщиной порядка 2—3 мм и небольшой ϵ порядка 3—4. Рекордные практические значения удельной емкости дают электролитические конденсаторы: до 300—500 мкф/см³. В них используются очень тонкие оксидные слои с толщиной менее 0,1—1 мм при значениях $\epsilon \approx 10 \div 25$.

Поскольку толщина диэлектрика d выбирается в зависимости от напряжения U , величина $c_{уд}$ также должна зависеть от напряжения. Используя формулу (232) и вводя в нее напряженность поля E в в/см, имеем:

$$c_{уд} = 0,0884 \frac{\epsilon E^2}{U^2}. \quad (234)$$

Принимая, что $E \approx \text{const}$, получаем рост $c_{уд}$ при снижении напряжения (рис. 139) за счет соответствующего снижения тол-

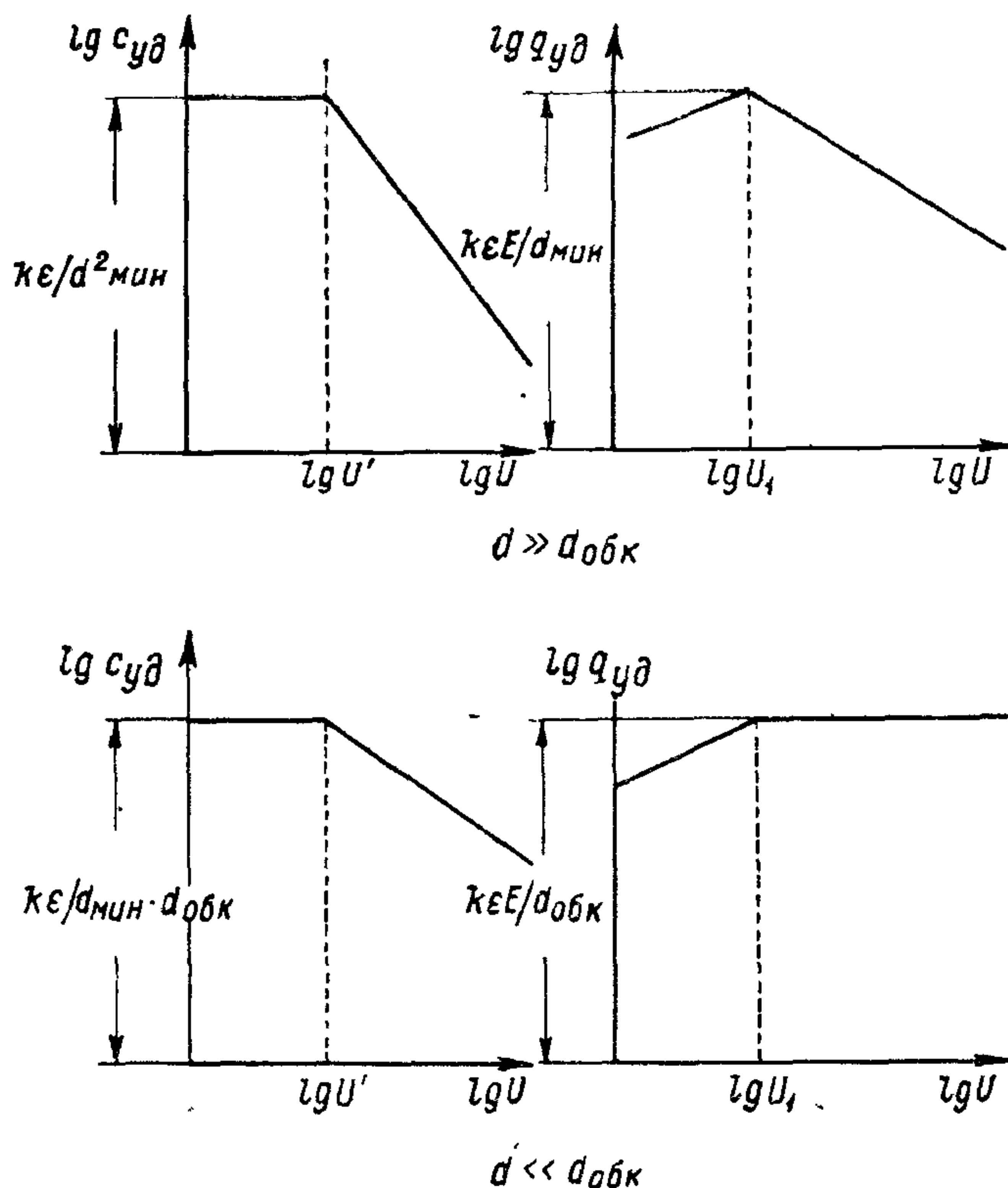


Рис. 139. Зависимость удельной емкости и удельного заряда конденсатора от номинального напряжения. Вверху — толщина диэлектрика много больше толщины обкладок; внизу — толщина диэлектрика много меньше толщины обкладок.

щины диэлектрика. Однако последнее не безгранично: при некотором значении $U = U'$ мы приходим к значению $d_{мин}$, ниже которого мы уже не можем опуститься из технологических соображений, связанных с понижением механической прочности при очень малых толщинах. Поэтому при снижении U ниже U' величина $c_{уд}$ остается постоянной и равной $0,0884 \frac{\epsilon}{d_{мин}^2}$. Это максимальное

для заданного типа диэлектрика значение $c_{уд}$ является характерным и может применяться для сравнения различных типов конденсаторов. Указанные выше значения $c_{уд}$ для сегнетокерамических, тонкопленочных и электролитических конденсаторов относятся именно к таким максимальным значениям $c_{уд}$, полученным при учете полного объема конденсаторов. В случае напряжений больших U' для сравнения значений $c_{уд}$ надо брать их при равных значениях рабочих напряжений, чтобы получить возможность правильной сравнительной оценки различных типов конденсаторов.

Выражение (232) получено в предположении, что $d \gg d_{обк}$, т. е. толщиной обкладок можно пренебречь. Это вполне допустимо при использовании тонких металлизированных обкладок и дает лишь небольшую ошибку при фольговых обкладках в конденсаторах высокого напряжения с относительно толстым диэлектриком. Однако в случае электролитических конденсаторов мы имеем обратную картину: $d \ll d_{обк}$, так как толщина оксидного слоя (меньше 1 мкм) много меньше суммарной толщины анода, катода и волокнистой прокладки или слоя электролита, образующих собой обкладки электролитического конденсатора. В этом случае необходимо учесть толщину обкладки, и мы получим:

$$c_{уд} = \frac{0,0884 \frac{\varepsilon S}{d}}{S(d + d_{обк})} \approx 0,0884 \frac{\varepsilon}{d d_{обк}} = 0,0884 \frac{\varepsilon E}{d_{обк} U}. \quad (235)$$

При этом $c_{уд}$ также зависит от напряжения, но уже не от второй, а от первой его степени.

Величину удельного заряда $q_{уд}$ можно получить, умножая $c_{уд}$ на величину напряжения U . При этом, используя выражение (235), для случая электролитических конденсаторов получаем:

$$q_{уд} = c_{уд} U = 0,0884 \frac{\varepsilon E}{d_{обк}}. \quad (236)$$

В данном случае $q_{уд}$ в области напряжений $U > U'$ не зависит от напряжения¹, а потому является удобным и объективным критерием качества электролитических конденсаторов. При $d \gg d_{обк}$, используя формулу (234), получаем:

$$q_{уд} = c_{уд} U = 0,0884 \frac{\varepsilon E^2}{U}. \quad (237)$$

В этом случае $q_{уд}$ зависит от напряжения, хотя и не в такой степени, как удельная емкость.

Фактический объем конденсатора может значительно превосходить активный объем диэлектрика не только за счет объема, занятого обкладками и закраинами конденсатора, но и за счет его

¹ Фактические значения, учитывающие полный объем конденсатора, несколько изменяются с напряжением.

внешнего конструктивного оформления. Влияние последнего уменьшается при увеличении номинальной емкости конденсатора, а потому фактическая величина $c_{уд}$ возрастает с увеличением номинальной емкости (рис. 140). Поэтому при сравнении двух различных типов конденсаторов по величине $c_{уд}$ надо подбирать не только равные или близкие значения рабочих напряжений, но и близкие значения $C_{ном}$. На рис. 140 приведены данные для конденсаторов, отличающихся высокими значениями удельной емкости.

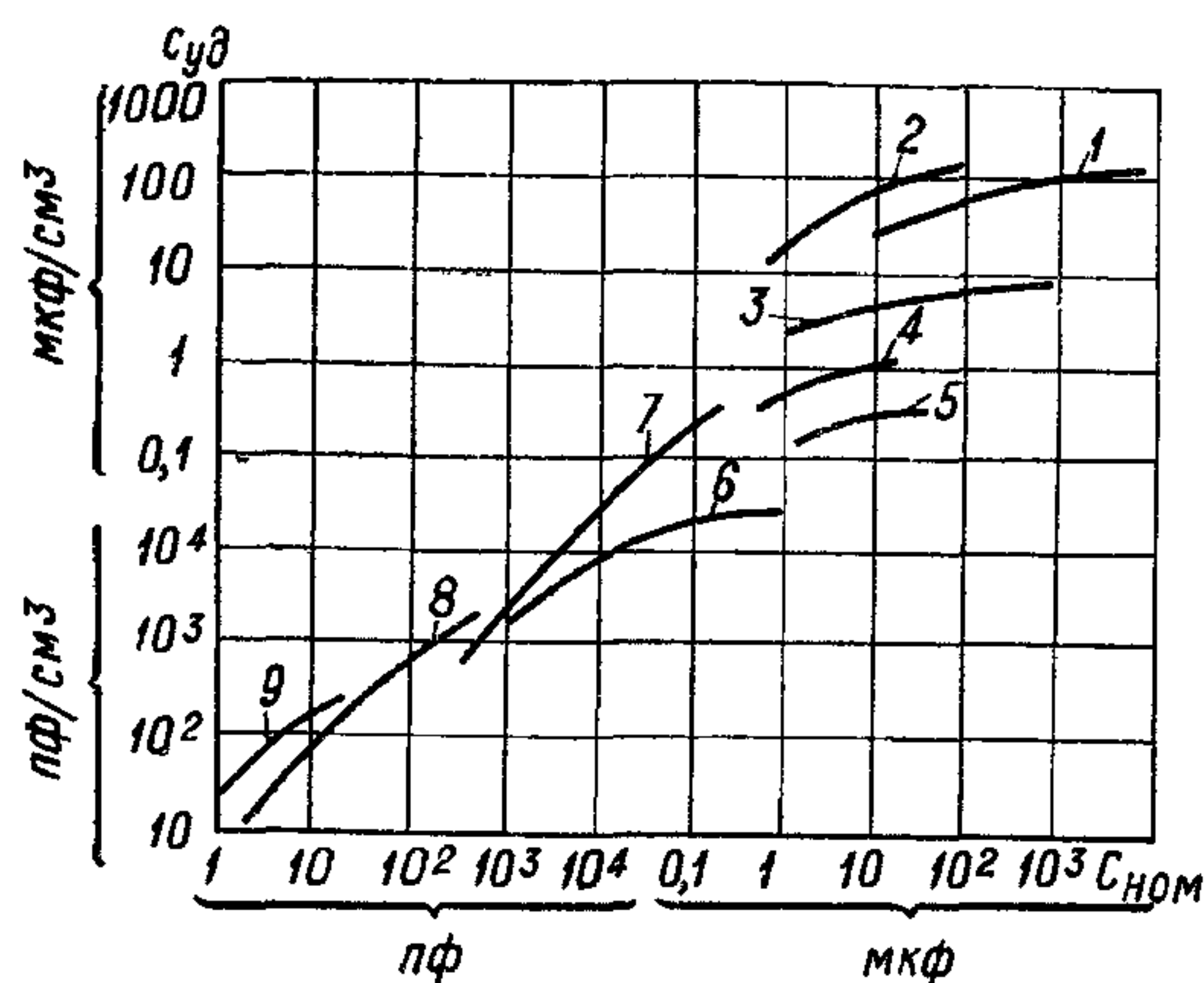


Рис. 140. Зависимость удельной емкости конденсаторов различных типов от номинальной емкости.

1 — алюминиевые сухие электролитические конденсаторы на 10 в (К50-7); 2 — ниобиевые оксидно-полупроводниковые конденсаторы на 6 в (К53-4); 3 — сухие алюминиевые конденсаторы на 160 в (К76-2); 4 — лакопленочные конденсаторы на 100 в (К76-2); 5 — однослойные металлобумажные конденсаторы на 160 в (МВГО); 6 — бумажные конденсаторы на 200 в (КБГ); 7 — монолитные керамические конденсаторы на 160 в; 8 — керамические конденсаторы на 200 в (КТКМ); 9 — керамические конденсаторы трубчатого типа на 200 в (КТКД).

высокую удельную емкость дают керамические монолитные конденсаторы, которые теперь обгоняют в этом отношении бумажные конденсаторы старого типа КБГ (напряжение 200 в). В области малых емкостей, порядка 1—100 пф, наибольшую удельную емкость дают обычные трубчатые и дисковые керамические конденсаторы вследствие простоты их конструкции и практического отсутствия внешнего оформления.

§ 52. Удельная энергия

Вопрос о величине энергии, накапливаемой в единице объема конденсатора, приобрел в последние годы особенно важное значение в связи с широким применением конденсаторов в качестве накопителей энергии в разнообразных областях техники, начиная от установок для исследования термоядерных реакций и кончая квантовыми оптическими генераторами (лазерами). Одним из последних примеров использования накопительных конденсаторов является магнито-импульсная обработка металлов.

Во всех этих случаях желательно иметь конденсаторы с максимально возможной удельной энергией в единице объема.

Для простейшего случая плоского конденсатора с учетом только активного объема диэлектрика V , используя формулы (41) и (234), получаем

$$a_{\text{уд}} = \frac{A}{V} = \frac{CU^2}{2V} = \frac{U^2}{2} c_{\text{уд}} \cdot 10^{-12} = 0,0442 \cdot 10^{-12} \varepsilon E^2 \text{ [дж/см}^3\text{]}. \quad (238)$$

Здесь множитель 10^{-12} введен для перевода $c_{\text{уд}}$ из пф/см^3 в ф/см^3 , так как C выражено в ф ; напряженность поля E — в в/см .

Часто величину $a_{\text{уд}}$ выражают в дж/л ($1 \text{ л} = 10^3 \text{ см}^3$). Если при этом подставлять E в обычных единицах (кв/мм), то получим:

$$a_{\text{уд}} = 4,42 \cdot 10^{-3} \varepsilon E^2 \text{ [дж/л]}. \quad (239)$$

Таким образом, для получения большой удельной энергии надо набирать для изготовления конденсаторов диэлектрики с высокой ε и с высокой электрической прочностью, позволяющей применять высокие значения рабочей напряженности поля E .

Как известно, наибольшими значениями ε обладает сегнетокерамика, но у нее низкая электрическая прочность и малая величина $E \approx 0,5 \text{ кв/мм}$. Принимая это значение и $\varepsilon = 10\,000$, находим значение удельной энергии: $a_{\text{уд}} = 4,42 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4 \cdot 0,25 = 10 \text{ дж/л}$. Фактически при учете полного объема для подобных конденсаторов можно получить 5—6 дж/л . Пропитанная бумага имеет относительно низкую ε , порядка 4—6, но ее электрическая прочность высока и можно принимать $E \approx 50 \div 100 \text{ кв/мм}$ в зависимости от требуемого срока службы конденсатора-накопителя. Принимая $\varepsilon = 5$ и $E = 100 \text{ кв/мм}$, получаем теоретическое значение $a_{\text{уд}} = 4,42 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^4 = 221 \text{ дж/л}$. Фактически при сокращенном сроке службы для бумажных конденсаторов можно получать 60—70 и даже 100—150 дж/л , а при длительной работе 20—40 дж/л .

Еще более высокую электрическую прочность имеет оксидная пленка ($E \approx 500 \text{ кв/мм}$) при ε оксидных слоев порядка 10—25. Формулы (238) и (239) для этого случая непригодны даже для ориентировочного подсчета, так как не учитывают толщины обкладки. Фактически для современных электролитических конденсаторов с учетом полного их объема можно получать до 200—400 дж/л , что является рекордным значением в сравнении со всеми остальными типами конденсаторов¹, но лишь при напряжениях до 500—600 в , предельных для конденсаторов электролитического типа. Поэтому при более высоких напряжениях для накопления энергии приходится использовать бумажные конденсаторы (или с комбинированным пленочно-бумажным диэлектриком, см. § 86).

Формула (238) показывает, что удельная энергия не зависит от рабочего напряжения (если принять, в первом приближении, $E = \text{const}$). Поэтому величина $a_{\text{уд}}$ является удобной объективной

¹ В новых типах пленочных конденсаторов.

характеристикой для сравнения качества конденсаторов высокого напряжения. При напряжениях ниже U' (соответствующего минимально возможной толщине диэлектрика $d_{\text{мин}}$) при снижении напряжения снижается и E , так как $d = d_{\text{мин}} = \text{const}$, а потому в области малых напряжений $a_{\text{уд}}$ снижается при уменьшении напряжения (рис. 141).

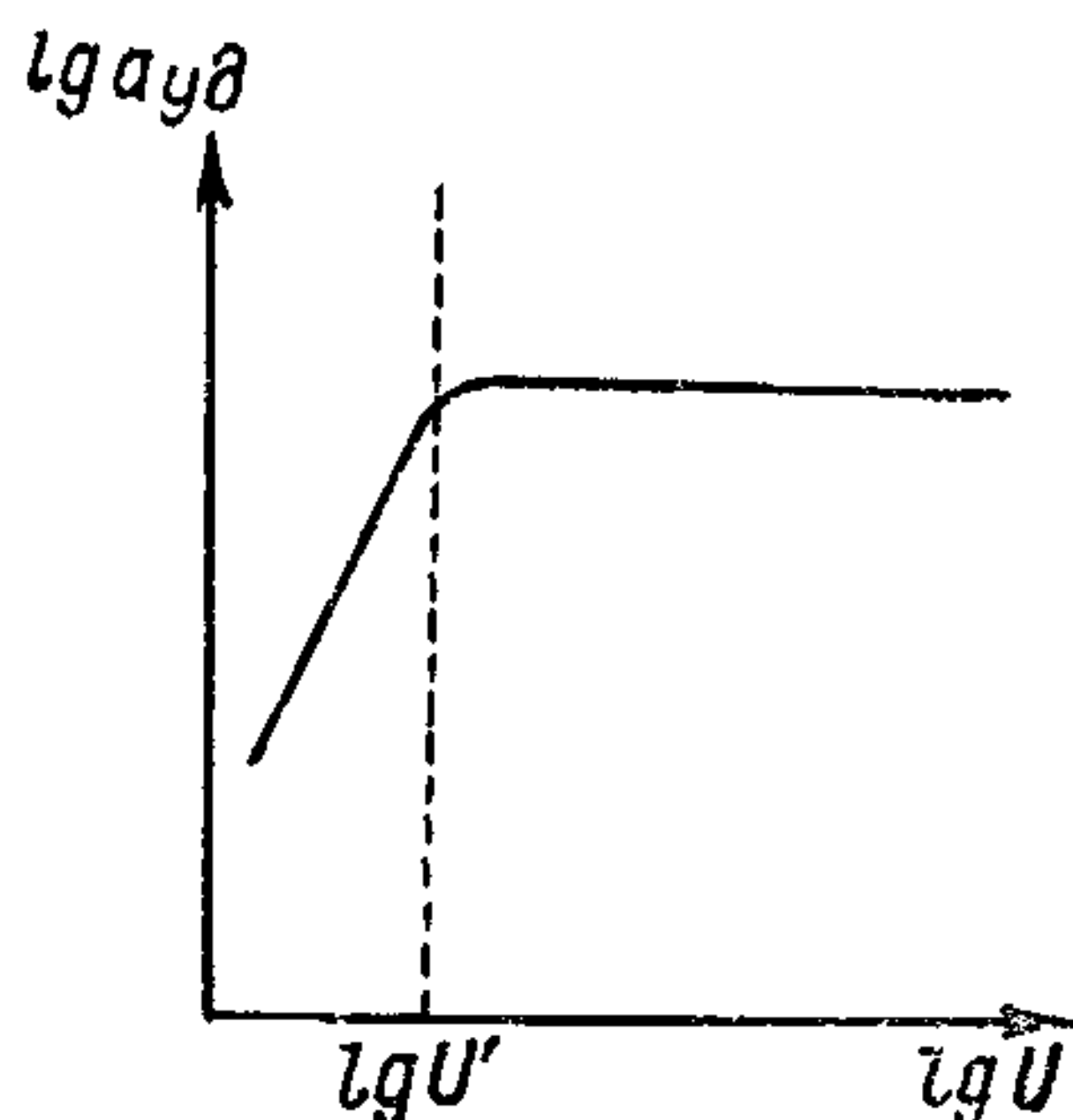


Рис. 141. Общий характер зависимости удельной энергии конденсатора от номинального напряжения.

Иногда вместо $a_{\text{уд}}$ применяют обратную ей величину удельного объема, рассчитанного на единицу энергии: $v'_{\text{уд}}$ в $\text{см}^3/\text{дж}$ или в $\text{л}/\text{дж}$. Для накопительных конденсаторов, рассчитанных на использование в переносных устройствах, используют также значение веса, отнесенное к единице энергии. Для современных алюминиевых электролитических конденсаторов, применяемых для

накопления энергии при напряжениях 300—400 в, можно получать до 4—6 г/дж, а для конденсаторов с комбинированным пленочно-бумажным диэлектриком при напряжениях 3—5 кв — до 10—12 г/дж.

§ 53. Удельная реактивная мощность

Эта характеристика представляет интерес, когда конденсатор используется для генерирования реактивной мощности при переменном напряжении как низкой, так и высокой частоты. Аналогично § 51, используя формулы (78) и (234), получаем:

$$P_{R \text{ уд}} = \frac{P_R}{V} = \frac{U^2 \omega C}{V} = U^2 \omega c_{\text{уд}} \cdot 10^{-12} = 0,55 \cdot 10^{-12} f \epsilon E^2 [\text{вар}/\text{см}^3], \quad (240)$$

где частота f — в гц и E — в в/см.

Таким образом, удельная реактивная мощность $P_{R \text{ уд}}$ оказывается зависящей от частоты. Проанализируем эту зависимость, учитывая, что допускаемая напряженность поля в диэлектрике также будет зависеть от частоты, т. е. $E = F(f)$ и, следовательно:

$$P_{R \text{ уд}} = k \epsilon f F(f)^2. \quad (241)$$

Предположим, что до некоторой частоты f_1 нагрев конденсатора от его диэлектрических потерь еще невелик и можно полагать, что E определяется только электрической прочностью, которая в этом диапазоне частот мало зависит от частоты. Тогда можно принять, что при $f < f_1$ величина $E = F(f) = \text{const}$. В этом случае величина $P_{R \text{ уд}}$ должна возрастать пропорционально частоте (рис. 142).

Допустим, что в интервале частот от f_1 до f_2 нагрев конденсатора достаточно заметен и определяется только диэлектрическими

потерями, причем $\operatorname{tg} \delta$ мало зависит от частоты. В этом случае допускаемое рабочее напряжение будет определяться уже не электрической прочностью диэлектрика, а допускаемым нагревом конденсатора [формула (200)]. В этом случае $E = F(f) = k_1 \cdot 1/\sqrt{f}$, и с ростом частоты мы должны снижать E обратно пропорционально \sqrt{f} , чтобы поддерживать температуру конденсатора неизменной и рав-

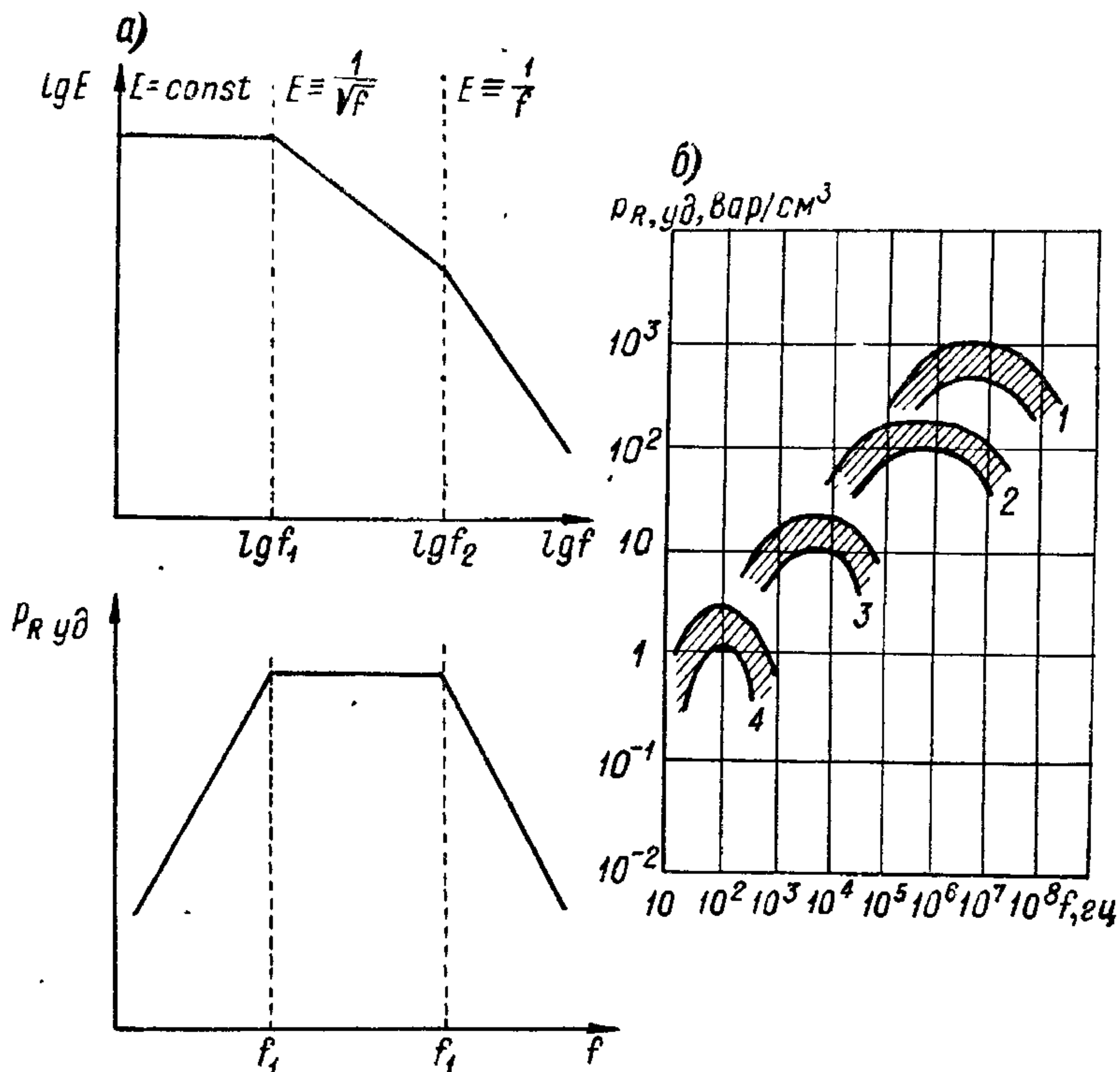


Рис. 142. Удельная реактивная мощность конденсаторов: а — зависимость допускаемой напряженности поля (вверху) и реактивной мощности (внизу) от частоты; б — зависимость удельной реактивной мощности конденсаторов от частоты при различных диэлектриках

(1 — вакуум; 2 — сжатый газ, керамика, слюда; 3 — неполярные синтетические пленки; 4 — пропитанная бумага).

ной допускаемому значению. При этом $F(f)^2 = \frac{k_1^2}{f}$, и по формуле (241) мы получаем, что в интервале частот от f_1 до f_2 величина $P_{R \text{ уд}} = k k_1^2 \varepsilon = \text{const}$.

Предположим, что при частотах выше f_2 начинают сказываться потери в металлических частях конденсатора и $\operatorname{tg} \delta$ начнет возрастать с частотой практически линейно (§ 27). В этом случае в формуле (200) можно положить $\operatorname{tg} \delta \approx \omega C r$, где r — сопротивление, эквивалентное потерям в металле; тогда $E^2 = F(f)^2 = k_2^2 \cdot 1/f^2$ и с ростом частоты мы должны снижать напряжение на конденсаторе

обратно пропорционально частоте (а не корню из частоты, как выше), чтобы поддержать его температуру на допустимом уровне. В этом случае $p_{R \text{ уд}} = k k_2^2 \varepsilon \frac{1}{f}$ т. е. при $f > f_2$ удельная реактивная мощность также должна снижаться с ростом частоты (рис. 142).

Таким образом, мы нашли, что для заданного типа конденсатора в диапазоне частот от f_1 до f_2 удельная реактивная мощность достигает максимального значения, т. е. использование конденсатора как источника реактивной мощности будет наилучшим.

Найдем это максимальное значение, полагая $f = f_1$ и используя формулы (200) и (2):

$$\begin{aligned} (p_{R \text{ уд}})_{\text{макс}} &= 0,55 \cdot 10^{-12} / \varepsilon \left(\frac{U}{d} \right)^2 = \\ &= 0,55 \cdot 10^{-12} / \varepsilon \frac{\alpha_T S_{\text{ох}} \Delta t_K \cdot 10^{12}}{2\pi f 0,0884 \varepsilon S \lg \delta \cdot d} = \frac{2\alpha_T \Delta t_K}{d \lg \delta}. \end{aligned} \quad (242)$$

Здесь принято, что площадь охлаждения $S_{\text{ох}}$ равна удвоенному значению площади обкладки S .

В отличие от величин $c_{\text{уд}}$ и $a_{\text{уд}}$ максимальное значение $(p_{R \text{ уд}})_{\text{макс}}$ не зависит от ε диэлектрика, как показывает формула (242). Поэтому для изготовления конденсаторов с большой реактивной мощностью при соответствующих значениях частоты могут быть с успехом использованы неполярные диэлектрики ($\varepsilon \approx 2$) и даже газы ($\varepsilon = 1$). Повышение удельной реактивной мощности можно получить, снижая толщину диэлектрика (поскольку это допускает величина рабочего напряжения) и увеличивая нагревостойкость (т. е. повышая допустимое значение перегрева Δt_K).

Эффективным средством для повышения максимального значения удельной реактивной мощности является также увеличение коэффициента теплоотдачи α_T , т. е. применение форсированного охлаждения (§ 48).

Для различных типов конденсаторов максимальное значение удельной реактивной мощности располагается в различном диапазоне частот, причем с уменьшением угла потерь конденсатора максимум $p_{R \text{ уд}}$ возрастает по абсолютной величине и смещается в сторону более высоких частот. Примерные фактические значения $p_{R \text{ уд}}$ (рассчитанные для полного объема конденсатора) показаны на рис. 142, б для нескольких основных типов конденсаторов с большой реактивной мощностью. Рекордные значения, порядка сотен вар/см^3 в области коротких волн, можно получить, используя вакуумные конденсаторы, обладающие наименьшими потерями и относительно высокой электрической прочностью. В области частот 0,1—1 Мгц примерно одинаковые значения удельной реактивной мощности порядка 50—100 вар/см^3 можно было получать для слюдяных, керамических и газонаполненных конденсаторов. Теперь в этой области частот конденсаторы из новых типов керамики оказываются наиболее эффективными и значения удельной мощности у них выше (§ 71). В области технической частоты 50—60 гц наибольшую удельную реактивную мощность порядка

1—3 вар/см³ (1—3 квар/л) дают бумажные конденсаторы. Эти же конденсаторы применяют и при частотах 1—10 кГц, используя водяное охлаждение в связи с увеличением потерь при таких частотах. Для этой области частот перспективным является использование неполярных синтетических пленок, обладающих малым $\operatorname{tg} \delta$ и позволяющих отказаться от применения водяного охлаждения. Для них можно ожидать значения $(\rho_{\text{в уд}})_{\text{макс}}$ порядка 10—25 вар/см³ (10—25 квар/л).

§ 54. Удельные характеристики конденсаторной секции

При выводе формул (232), (237), (238) и (240) мы исходили из величины объема V , соответствующей только активной части объема диэлектрика, и не учитывали ни объема обкладок, ни величины закраин конденсатора. Для того чтобы получить значение удельной емкости, рассчитанной на единицу объема конденсаторной секции, т. е. учесть влияние обкладок и закраин конденсатора на величину объема, можно использовать теоретическую формулу (232), введя в нее поправочный коэффициент k :

$$c_{\text{уд}} = \frac{0,0884\epsilon}{kd^2} [n\phi/\text{см}^3]. \quad (243)$$

Здесь d — толщина диэлектрика в см.

Для секции многопластинчатого конденсатора с общим числом обкладок, равным N , поправочный коэффициент

$$k = \left(1 + \frac{2\Delta l}{l} + \frac{2\Delta b}{b} + \frac{4\Delta l \Delta b}{lb}\right) \left[1 + \frac{Nd_{\text{обк}}}{(N-1)d}\right], \quad (244)$$

где l — активная длина обкладки, b — активная ширина обкладки, Δl — закраина в направлении длины обкладки, Δb — закраина в направлении ширины обкладки и $d_{\text{обк}}$ — толщина обкладки (размеры в см).

Для намотанной спиральной конденсаторной секции поправочный коэффициент равен:

$$k = \left(1 + \frac{d_{\text{обк}}}{d}\right) \left(1 + \frac{2\Delta b}{b}\right), \quad (245)$$

где обозначения те же, что и в формуле (244).

В случае металлизированных конденсаторов, когда $d_{\text{обк}} \ll d$, можно упростить формулы (244) и (245), полагая в них $d_{\text{обк}} \approx 0$.

В случае намотанных электролитических конденсаторов сухого типа мы имеем обратную картину: $d_{\text{обк}} \gg d$. При этом толщина двух обкладок складывается из толщины пластины вентильного металла (анода) d_a , толщины волокнистой прокладки, пропитанной электролитом, $d_{\text{пр}}$ и толщины контактной катодной фольги d_k . На толщину оксидного слоя с одной стороны анода приходится суммарная толщина обкладки, равная

$$d_{\text{обк}} = d_{\text{пр}} + 0,5(d_a + d_k). \quad (246)$$

Величина d в таких конденсаторах обычно меньше 1 мм, а величина $d_{\text{обк}}$ может превышать 100 мм.

Используя выражение (243) и (245) и пренебрегая величиной d^2 в сравнении с $dd_{\text{обк}}$, получаем для секции намотанного электролитического конденсатора:

$$c_{\text{уд}} = \frac{0,0884 \cdot 10^{-6} \epsilon}{dd_{\text{обк}} \left(1 + \frac{2\Delta b}{b}\right)}, \quad (247)$$

где Δb — расстояние от края анода до края волокнистой прокладки, а b — ширина анода; значения d и $d_{\text{обк}}$ — в см; при использовании множителя 10^{-6} получаем $c_{\text{уд}}$ в мкф/см³, что удобно для данного типа конденсаторов с большой номинальной емкостью.

Толщина оксидного слоя пропорциональна напряжению формовки: $d = aU_{\text{ф}}$; значения a для разных вентильных металлов можно найти в главе XIII (табл. 29). В соответствии с этим, используя формулу (246), получаем для секции электролитического конденсатора:

$$c_{\text{уд}} = \frac{0,0884 \cdot 10^{-7} \epsilon}{aU_{\text{ф}} [d_{\text{пр}} + 0,5(d_{\text{а}} + d_{\text{к}})] \left(1 + \frac{2\Delta b}{b}\right)} [\text{мкф/см}^3], \quad (248)$$

где $U_{\text{ф}}$ — напряжение формовки в в, а значения толщин — в см.

Для конденсатора цилиндрического (трубчатого) типа удельная емкость будет равна:

$$c_{\text{уд}} = \frac{0,308 \epsilon l}{(l + 2\Delta l)(D_2 + 2d_{\text{обк}})^2 \lg \left(\frac{D_2}{D_1}\right)}, \quad (249)$$

где l — активная длина обкладки, Δl — закраина, D_1 — внутренний диаметр конденсатора (по диэлектрику), D_2 — наружный диаметр конденсатора (по диэлектрику) и $d_{\text{обк}}$ — толщина обкладки (все размеры в см, величина $c_{\text{уд}}$ — в нф/см³).

Используя значение $c_{\text{уд}}$, рассчитанное на объем конденсаторной секции, мы можем найти и уточненные значения $\epsilon_{\text{уд}}$, $a_{\text{уд}}$ и $R_{\text{в уд}}$, подставляя $c_{\text{уд}}$ по формуле (243) в формулы (237), (238) и (240). Во всех этих случаях мы получим удельные характеристики, отнесенные к объему конденсаторной секции. В этом объеме учтены обкладки и закраины, но не учтено внешнее конструктивное оформление конденсатора; поэтому фактические значения удельных характеристик, при вычислении которых использовался полный объем конденсатора, найденный по наружным габаритным размерам, будут всегда несколько ниже, чем значения, подсчитанные по формуле (242) или по уточненным формулам (237), (238) и (240); в которых использован поправочный коэффициент k . Поэтому при расчете конденсаторов истинное значение удельных характеристик можно найти лишь тогда, когда выбрано конструктивное оформление конденсатора и по чертежу можно взять габаритные размеры, определяющие величину фактического объема конденсатора.

§ 55. Удельная стоимость конденсаторов

Исследуя зависимость преysкурантных цен на конденсаторы от электрических номинальных данных конденсаторов М. М. и Т. И. Лернеры нашли интересные закономерности: для конденса-

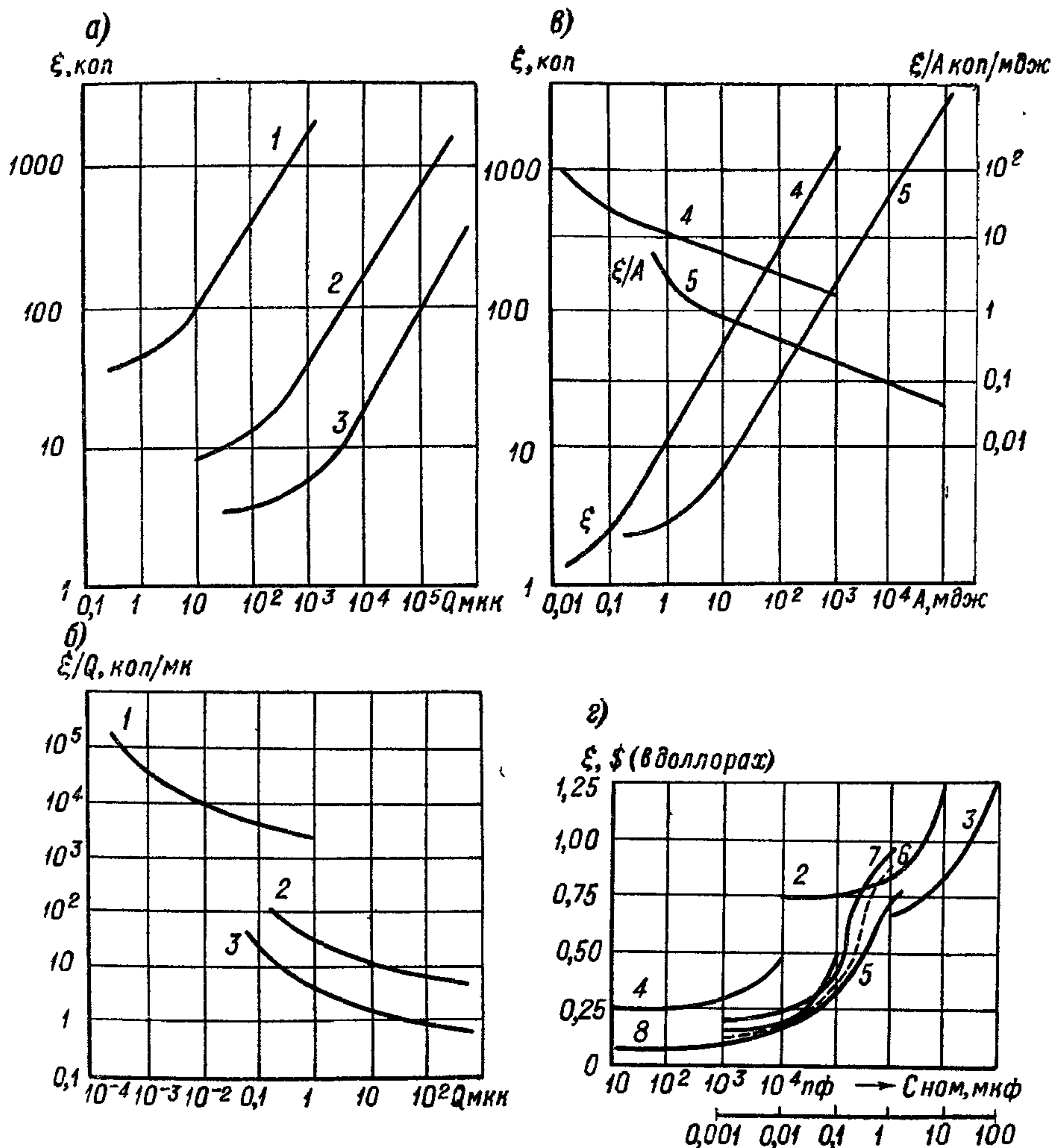


Рис. 143. Стоимость конденсаторов: а — зависимость стоимости отечественных конденсаторов от заряда; б — зависимость удельной стоимости от заряда; в — зависимость стоимости и удельной стоимости от энергии; г — зависимость стоимости американских конденсаторов от номинальной емкости.

1 — фторопластовые; 2 — металлобумажные; 3 — алюминиевые электролитические; 4 — слюдяные; 5 — бумажные; 6 — майларовые; 7 — бумажномайларовые; 8 — керамические конденсаторы.

торов электролитических, металлобумажных и фторопластовых стоимость конденсатора по преysкуранту оказалась в определенной зависимости от величины заряда, а для конденсаторов

бумажных с фольговыми обкладками и для слюдяных — от величины номинального запаса энергии (рис. 143). Поэтому можно ввести представление об удельной стоимости конденсатора, отнесенной к единице заряда или к единице накопленной энергии. На рис. 143 показана зависимость этой характеристики от величины заряда и от величины энергии конденсатора. Во всех случаях наблюдается снижение удельной стоимости по мере увеличения заряда или энергии конденсатора, т. е. по мере увеличения размеров конденсаторов. Мелкие конденсаторы стоят относительно дороже за единицу энергии или заряда, поскольку в их стоимости играет большую роль стоимость внешнего оформления (корпус, выводные изоляторы, заливка или опрессовка), которая меньше зависит от размеров конденсатора, чем стоимость активных материалов (в основном стоимость диэлектрика). Данные рис. 143 показывают, насколько сильно влияет тип диэлектрика на стоимость конденсатора. При равных значениях заряда наиболее дешевым типом конденсатора является алюминиевый электролитический конденсатор, который почти на порядок величины дешевле металлобумажного конденсатора. Еще выше стоимость фторопластового пленочного конденсатора в связи с высокой ценой синтетической пленки. При равных значениях энергии слюдяные конденсаторы значительно дороже бумажных.

Представляет интерес сравнить влияние типа диэлектрика на стоимость конденсаторов с одними и теми же номинальными данными. Такое сравнение было сделано в США в 1964 г. Тэрнером для конденсаторов емкостью 5000 *пф* с номинальным рабочим напряжением 500 *в* (заряд конденсатора 2,5 *мк*, энергия 0,625 *мдж*). Ниже указаны данные Тэрнера и подсчитанные нами удельные значения:

Тип конденсатора	Стоимость, центы	Удельная стоимость:	
		цент/ <i>мк</i>	цент/ <i>мдж</i>
Бумажный	15	6	24
Майларовый (ПЭТФ)	15	6	24
Керамический (н. ч.)	15	6	24
Полистирольный	21	8,3	33,6
Металлобумажный	27	10,8	43
Слюдяной фольговый	42	16,8	67,5
Слюдяной серебряный	99	39,5	158
Стеклопленочный	209	83,5	335

Зависимость стоимости конденсаторов (за штуку) от номинальной емкости (США, 1963 г.) показана на рис. 143, г.

Надо отметить, что данные США для нас недостаточно характерны. Так, пленочные конденсаторы в США относительно дешевле, а слюдяные конденсаторы дороже в виду дефицитности слюды

в США. Интересно, что стеклопленка, которую рассматривали как возможный дешевый заменитель слюды, в США даже при массовом автоматизированном производстве стеклопленочных конденсаторов дает значительно более высокую стоимость конденсаторов, чем слюда.

Повышенная цена конденсаторов в США в значительной степени связана с тем, что в настоящее время (например, по данным 1966 г.) они дефицитны в этой стране, несмотря на годовой выпуск в США порядка 2,5 миллиардов штук конденсаторов для радиоэлектроники и значительный импорт конденсаторов из Японии.

Часть вторая

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О КОНДЕНСАТОРАХ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

Глава X

КОНДЕНСАТОРЫ С ГАЗООБРАЗНЫМ И ЖИДКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

§ 56. Общая характеристика конденсаторов с газообразным диэлектриком

Первой особенностью газообразных диэлектриков является невозможность их использования для закрепления обкладок. В связи с этим в конструкции конденсатора приходится использовать дополнительный твердый диэлектрик, служащий для обеспечения требуемого зазора между обкладками разного знака, и применять обкладки увеличенной толщины (§ 20). Наличие твердого диэлектрика создает дополнительную паразитную емкость, включенную параллельно основной емкости, обусловленной воздушным зазором, и способную вызывать ухудшение характеристик конденсатора в сравнении с теми, которые может дать газообразный диэлектрик.

Вторая особенность — это восстанавливаемость электрической прочности конденсаторов после пробоя: случайный пробой при воздействии импульса напряжения для конденсатора с газообразным диэлектриком не опасен. Однако, если мощность источника энергии велика и пробой может перейти в дугу, то обкладки могут оплавиться и свариться, т. е. конденсатор будет испорчен.

Преимущества газообразного диэлектрика: весьма малая проводимость и ничтожный угол потерь (при условии исключения ионизации $\operatorname{tg} \delta < 10^{-5}$), независимость ϵ от частоты и весьма малая зависимость от температуры (для сухого воздуха $\operatorname{TK} \epsilon \approx -2 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$), полное отсутствие явления абсорбции ($k_a = 0$). Эти особенности делают газообразный диэлект-

рик особенно удобным для применения в образцовых конденсаторах и в различных типах высокочастотных конденсаторов.

Основные недостатки газообразного диэлектрика: низкое значение диэлектрической проницаемости ($\epsilon \approx 1$, например, для сухого воздуха $\epsilon = 1,0006$), необходимость применения больших зазоров между обкладками: при малых напряжениях — из конструктивных соображений, при высоких напряжениях — из-за низкой электрической прочности газов при обычных давлениях. Малая ϵ и большое значение $d_{\text{мин}}$ приводят к малым значениям удельной емкости $c_{\text{уд}}$ (§ 51), что ограничивает предельные значения номинальной емкости конденсаторов с газообразным диэлектриком величиной порядка 1000 нф , редко до $0,01 \text{ мкф}$.

При высоком напряжении, даже при емкости порядка 100 нф , воздушные конденсаторы исключительно громоздки. В этом случае необходима замена воздуха сжатым газом или вакуумом для повышения $E_{\text{пр}}$, соответственного снижения зазора и получения технически приемлемых размеров конденсатора (см. рис. 69). Газонаполненные конденсаторы нашли себе основное применение при напряжениях $100\text{—}500 \text{ кв}$ и выше в качестве образцовых конденсаторов и, в меньшей степени, в качестве контурных конденсаторов при частотах $10^5\text{—}10^6 \text{ гц}$. Вакуумные конденсаторы в основном используются в качестве контурных конденсаторов при частотах $10^6\text{—}10^8 \text{ гц}$, где они дают наибольшие значения удельной реактивной мощности по сравнению с остальными типами высокочастотных конденсаторов (см. рис. 142).

Воздушные конденсаторы постоянной емкости сохранили себе применение в основном только в качестве образцовых конденсаторов при небольших напряжениях, обычно ниже 1 кв , редко до $10\text{—}35 \text{ кв}$.

При использовании газообразного диэлектрика легко осуществить изменение емкости за счет перемещения одной системы обкладок по отношению к другой. Поэтому как воздушные, так и газонаполненные, а также и вакуумные конденсаторы находят себе применение и в качестве конденсаторов переменной емкости (глава XIV).

§ 57. Воздушные конденсаторы постоянной емкости

Основным типом современного воздушного конденсатора является образцовый конденсатор низкого напряжения с плоскими пластинами круглой формы. Отечественные конденсаторы этого типа рассчитаны на испытательное напряжение 500 в (50 гц) и на работу при температуре $15\text{—}20^\circ \text{С}$ и относительной влажности до 70% . В качестве твердого диэлектрика в них использован кварц. Конденсаторы изготавлиются в двух модификациях: КВМ с диаметром 210 мм (емкость $50\text{—}400 \text{ нф}$) и КВС с диаметром 290 мм (емкость $1000\text{—}4000 \text{ нф}$). При больших

значениях емкости у нас применяются образцовые слюдяные конденсаторы (§ 67). За рубежом применялись также воздушные конденсаторы с емкостью до 0,1—0,2 мкф, но они очень громоздки и уступают слюдяным конденсаторам по стабильности емкости.

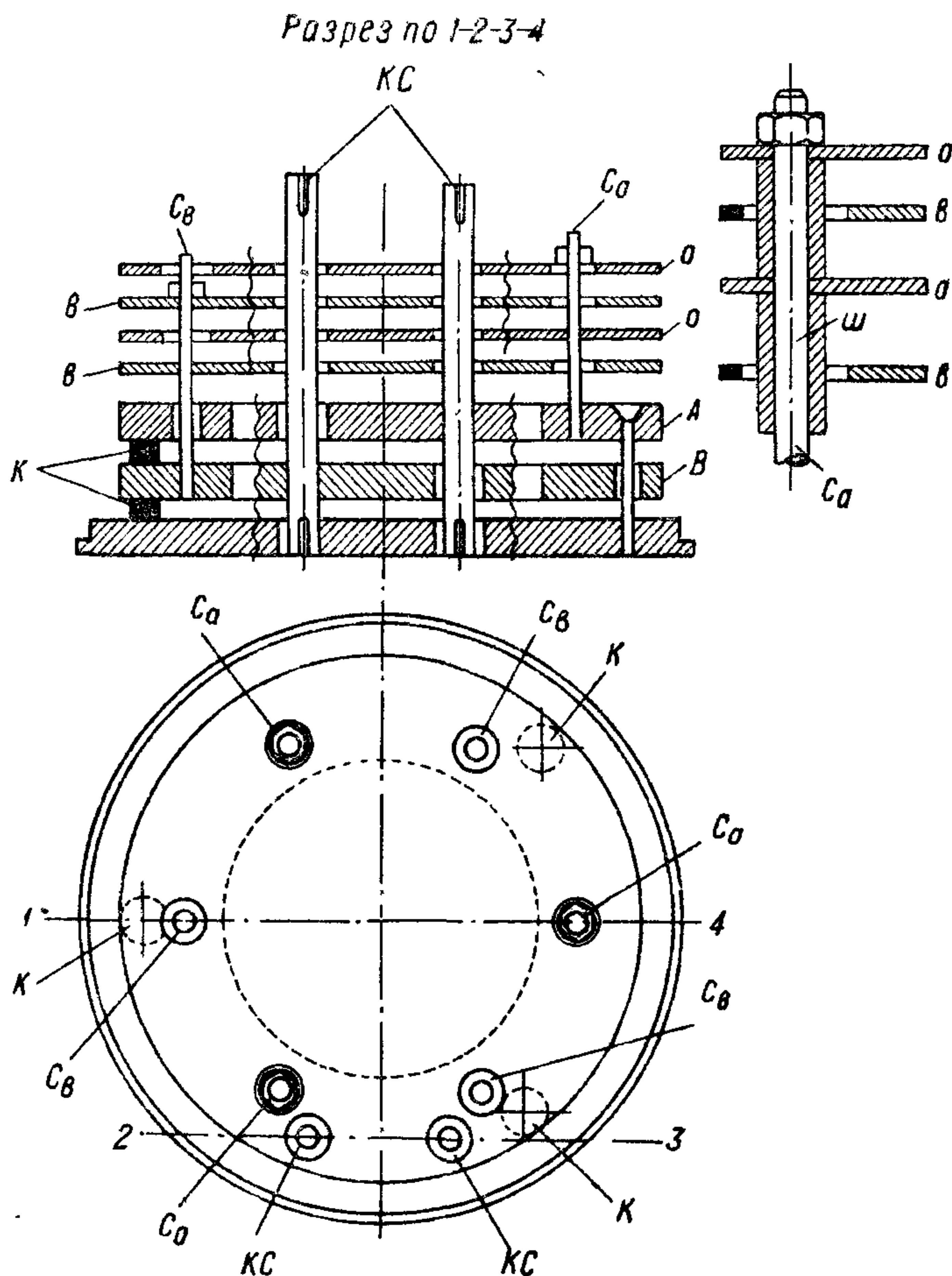


Рис. 144. Схема конструкции образцового воздушного конденсатора.

Схема конструкции образцового воздушного конденсатора показана на рис. 144. Основой конструкции служат два массивных латунных кольца A и B, изолированных кварцевыми цилиндрами K; емкость между кольцами позволяет получить номинальные значения 50 и 100 пф; при бóльших значениях емкости приходится использовать дополнительные пластины a и b, которые с помощью разделительных шайб — ш, укрепляются на стержнях C_a и C_b , соединенных с соответствующим из колец A или B. Изоляция между стержнями и пластинами противоположного знака осуще-

ствляется вырезами в пластинах. На кольцах укреплены также контактные стержни $KС$, проходящие по всей высоте конденсатора и выходящие наружу как со стороны крышки, так и дна конденсатора. Это позволяет осуществлять параллельное соединение конденсаторов, ставя их один на другой и соединяя контактные стержни соседних конденсаторов с помощью пружинящих штепселей, вставляемых в гнезда на концах контактных стержней. Этим достигается минимальное изменение емкости при параллельном включении. Для точной подгонки емкости (до $\pm 0,2 \text{ нф}$) на верхней пластине конденсатора делается секторный вырез, который может перекрываться «крылаткой» — подвижной пластинкой секторной формы; после подгонки емкости до требуемого значения «крылатка» зажимается в нужном положении с помощью винта.

Для включения образцовых конденсаторов в измерительную схему служит специальная подставка (рис. 145), которая далее связывается жесткой системой проводов со схемой. Емкость самой подставки составляет менее 25 нф для типа ПКМ и менее 28 нф — для ПКС. Включение конденсатора через подставку увеличивает общую индуктивность на $10 \cdot 10^{-9} \text{ гн}$. При установке группы конденсаторов на подставку их контактные стержни соединяются штепселями с гнездами подставки.

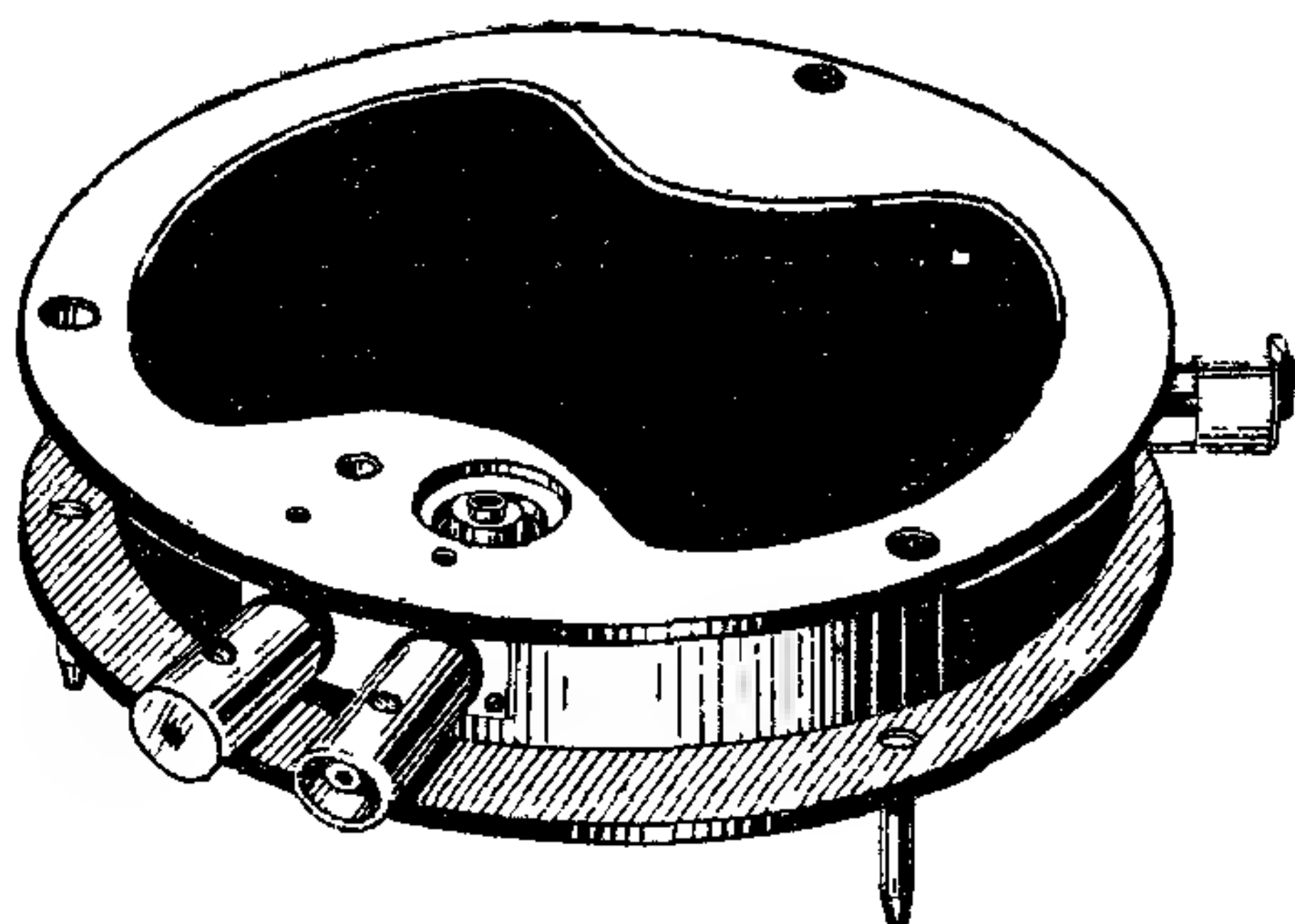


Рис. 145. «Подставка» для присоединения батареи воздушных конденсаторов к измерительному устройству.

Учитывая наличие емкости между пластинами конденсатора C_{12} и емкостей каждой системы пластин по отношению к корпусу — $C_{1к}$ и $C_{2к}$, между контактными стержнями (выводами конденсатора) можно измерить три значения емкости:

а) когда пластины не соединены с корпусом:

$$C' = C_{12} + \frac{C_{1к}C_{2к}}{C_{1к} + C_{2к}};$$

б) когда первая система соединена с корпусом:

$$C'' = C_{12} + C_{2к},$$

в) когда вторая система соединена с корпусом:

$$C''' = C_{12} + C_{1к}.$$

Рабочим значением считается емкость C'' , для которой и указывается номинальное значение с допускаемым отклонением, определяемым формулой

$$\Delta C_n = \pm \left(0,1 + \frac{20}{C_{ном}} \right) [\%], \quad (250)$$

где $C_{ном}$ — в нф .

Некоторые характеристики конденсаторов данного типа приведены ниже.

Характеристики	Допускаемые значения	Фактические значения
Допуск по емкости при 50 пф, %	$\pm 0,5$	—
То же при 4000 пф	$\pm 0,1$	—
Температурный коэффициент емкости, град ⁻¹ , $\times 10^6$	100	+ (20—60)
Тангенс угла потерь	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Индуктивность, <i>нн</i> , $\times 10^9$	50	15—30
Резонансная частота при 50 пф, Мгц	—	113
То же при 4000 пф	—	12
Частота, вызывающая погрешность емкости 0,1% при 50 пф, Мгц	—	3,6
То же при 4000 пф	—	0,4
Стабильность емкости во времени, %	—	0,01—0,02
Удельный объем при 300—400 пф, см ³ /пф	—	10—13
То же при 3000—4000 пф	—	2,5—3

Сопротивление изоляции конденсаторов должно быть не ниже 10^5 Мом; при повышенной влажности оно может снижаться за счет утечки по поверхности кварца.

Конденсаторы плоского типа за счет наличия индуктивности дают уже заметную погрешность емкости при частотах выше 0,5—1 Мгц. Поэтому для применения при высоких частотах

были разработаны цилиндрические конденсаторы коаксиальной конструкции типа КВЧ с емкостью 25—200 пф; диаметр наружного электрода 25 мм, твердый диэлектрик — стеатит. Резонансная частота при 200 пф равна 283 Мгц и при 25 пф равна 3000 Мгц.

Работы по улучшению конструкции образцовых конденсаторов ведутся и за рубежом. По данным Клотье, конденсатор плоской конструкции емкостью 1000 пф, герметизированный и наполненный азотом, за 2 года изменил емкость менее чем на $1 \cdot 10^{-4}\%$; в конден-

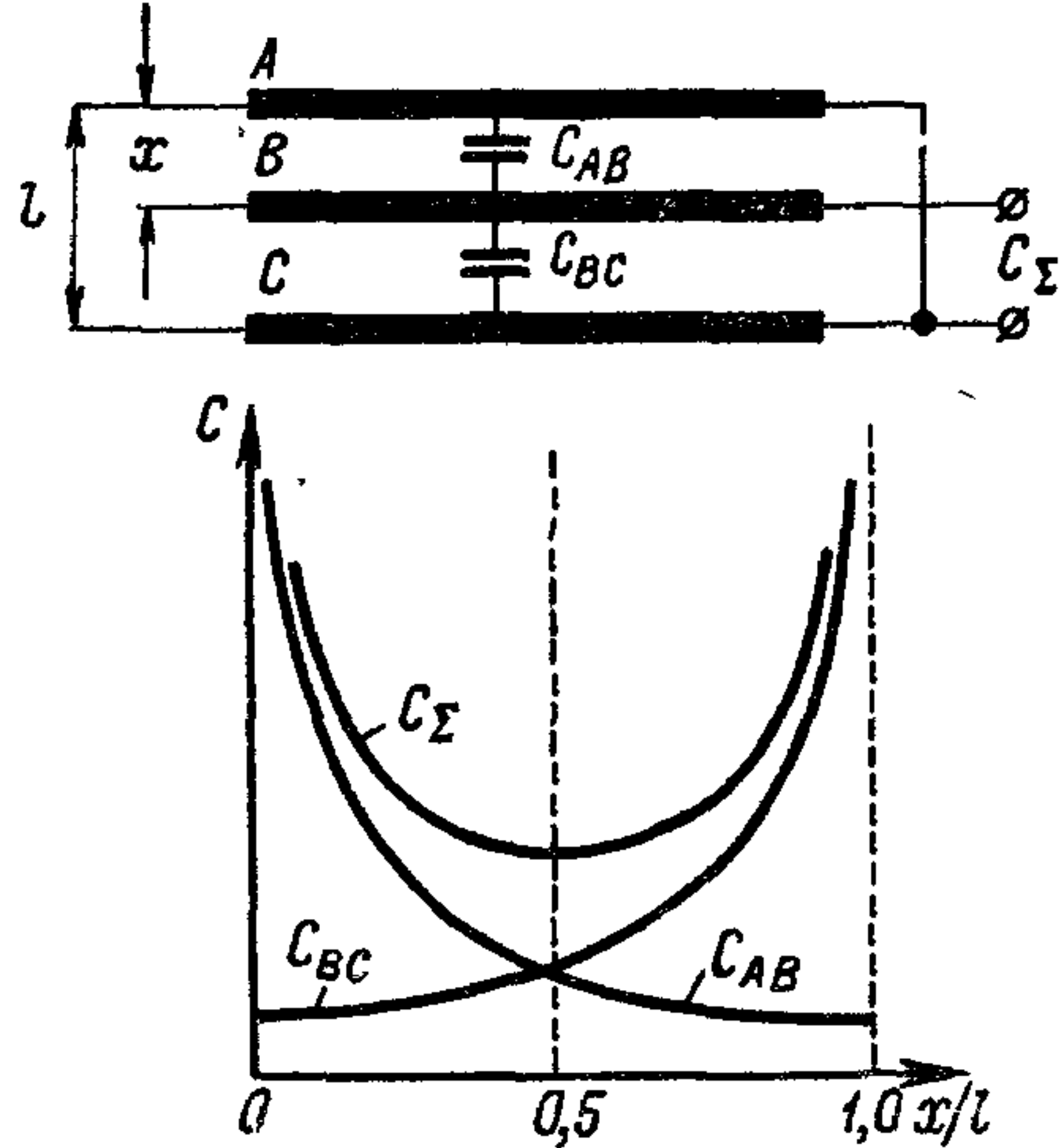


Рис. 146. Зависимость емкости конденсатора с тремя пластинами от положения средней пластины.

саторе использованы латунные пластины и латунные стержни, зазор 1 мм. Для этого конденсатора $\text{tg } \delta = (2 \div 2,5) \cdot 10^{-6}$; ТКЕ = $(17 \div 18) \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, т. е. близок к коэффициенту расширения латуни. Этого следовало ожидать для конденсаторов с кварцевой изоляцией ($\alpha_{\text{SiO}_2} = 0,5 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹) согласно формуле

(34), в которой можно пренебречь величиной α_e и положить $\alpha_d = \alpha_m$, поскольку увеличение зазора определяется в данном случае расширением крепящих втулок, а увеличение площади обкладок — расширением пластин, которые изготовлены из того же металла. Увеличенные значения ТКЕ, указанные выше для конденсаторов КВМ и КВС, объясняются тем, что благодаря несовершенству конструкции при нагревании происходит деформация пластин, вызывающая отклонение от теоретического значения ТКЕ; на величину ТКЕ может также оказывать влияние недостаточная центровка пластин при сборке. Действительно, рассмотрим простейший конденсатор с тремя пластинами (рис. 146). Суммарная емкость такого конденсатора будет равна:

$$C_{\Sigma} = C_{AB} + C_{BC} = 0,0884S \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{l-x} \right), \quad (251)$$

где S — площадь обкладки в см^2 , x и l — в см и C — в пф .

При изменении x от нуля до l емкость C_{AB} уменьшается от значения $C_1 = \infty$ до $C_2 = 0,0884 S/l$, а емкость C_{BC} увеличивается от C_2 до C_1 . Суммарная емкость достигает минимума при $x = l/2$ или $x/l = 0,5$, т. е. при расположении пластины B на равных расстояниях от пластин A и C , что соответствует точной сборке. При этом мы находимся на наиболее пологом участке

кривой $C_{\Sigma} = f(x/l)$, когда небольшие изменения x/l дают малые изменения C_{Σ} ; например, изменение x/l на 0,5% дает изменение C_{Σ} менее 0,01%. При неточной сборке, когда x/l заметно отличается от 0,5, мы попадаем на менее пологий участок кривой $C_{\Sigma} = f(x/l)$, где изменения C_{Σ} с изменением x/l , например вызванным изменениями температуры, оказываются более заметными. Так, при $x/l = 0,4$ изменение этого отношения на 0,5% дает изменение C_{Σ} на 0,41%.

Вместе с тем преднамеренным смещением пластин при сборке от центрального положения можно получить термокомпенсацию изменения емкости с температурой и снизить ТКЕ конденсатора. При этом крепление системы пластин разного знака надо проводить на стержнях из металлов с разным коэффициентом линейного расширения (рис. 147). В такой конструкции снижение C_{Σ} при увеличении x/l за счет расширения стержней (стоек) при нагревании компенсирует увеличение емкости, обусловленное расширением обкладок и увеличением S . За счет термокомпенсации можно снизить ТКЕ воздушного конденсатора до малых значений, порядка $\pm(2-5) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Заметное снижение ТКЕ можно получить при использовании для изготовления пластин и стержней специальных сплавов с малым коэффициентом линейного

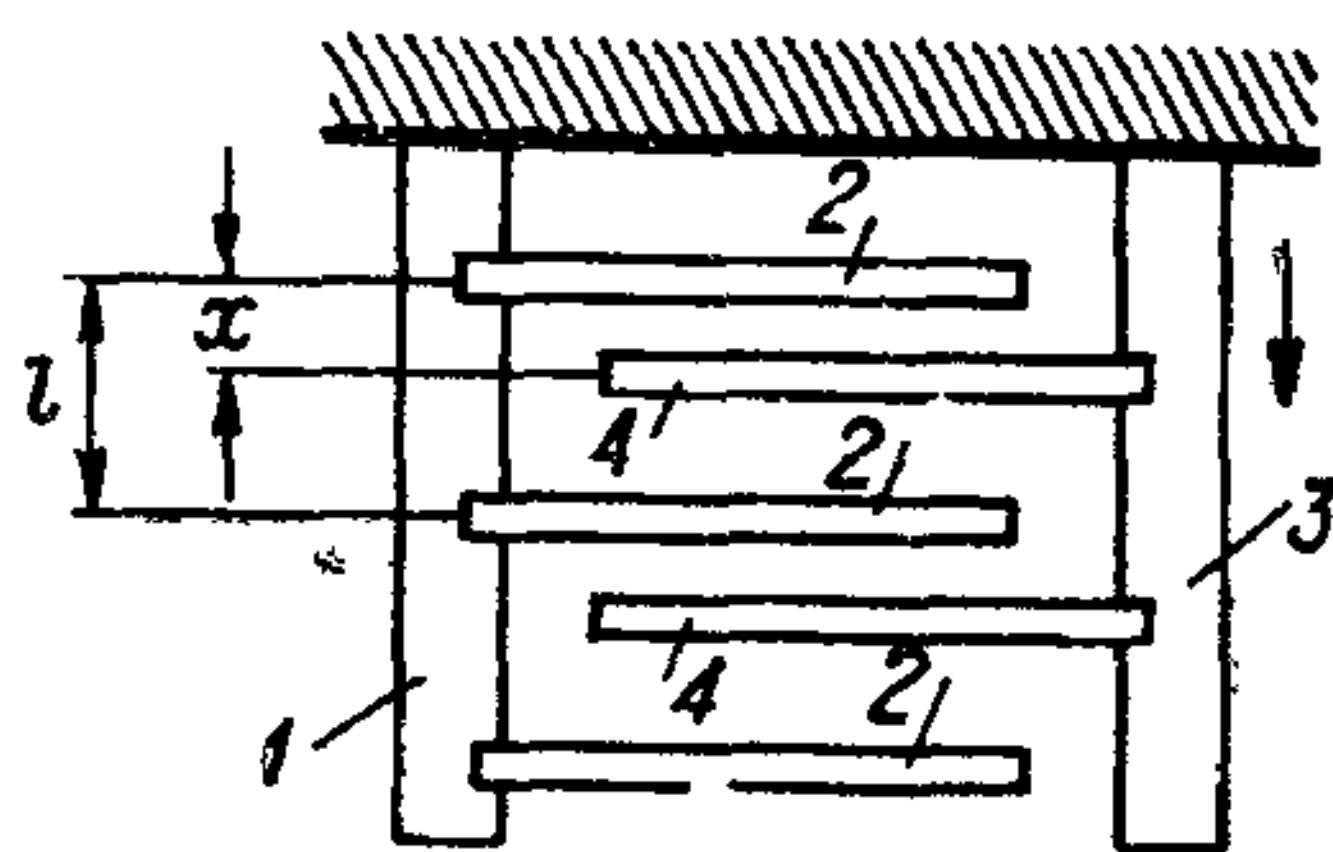


Рис. 147. Схема температурной компенсации воздушного конденсатора.

1 — стойка из материала с малым α_m ; 2 — пластины, соединенные с этой стойкой; 3 — стойка из материала с большим α_m ; 4 — пластины, соединенные с этой стойкой.

расширения, например инвара (64% Fe, 36% Ni; $\alpha_m = 1 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$). В этом случае теоретическое значение ТКЕ будет равно: $\text{ТКЕ} = \alpha_e + \alpha_m = -2 \cdot 10^{-6} + 1 \cdot 10^{-6} = -1 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. По данным Кутковского, в цилиндрических конденсаторах ТКЕ зависит только от геометрических изменений одного из электродов. Применяв центральный электрод в виде металлизированной трубки из плавленого кварца, он изготовил цилиндрический конденсатор емкостью 5 пф, который имел ТКЕ менее $1 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, причем быстрые изменения температуры не оказывали заметного влияния на емкость. Шильдс исследовал влияние напряжения на емкость конденсаторов с плоскими пластинами (1000 пф) и цилиндрических конденсаторов (100 пф). Для

зависимости емкости от напряжения было найдено уравнение:

$$C_U = C_0 (1 + KU^m), \quad (252)$$

где C_0 — емкость при нулевом напряжении, а K и m — постоянные. Для конденсаторов емкостью 1000 пф $m = 1,5$, а при емкости 100 пф $m = 2$. Изменения емкости были невелики, порядка 10^{-6} . Для конденсаторов с плоскими пластинами они определялись смещением пластин под действием напряжения, а у конденсаторов цилиндрического типа — изменением состояния поверхности электродов.

Наличие влаги может привести к изменению емкости образцо-

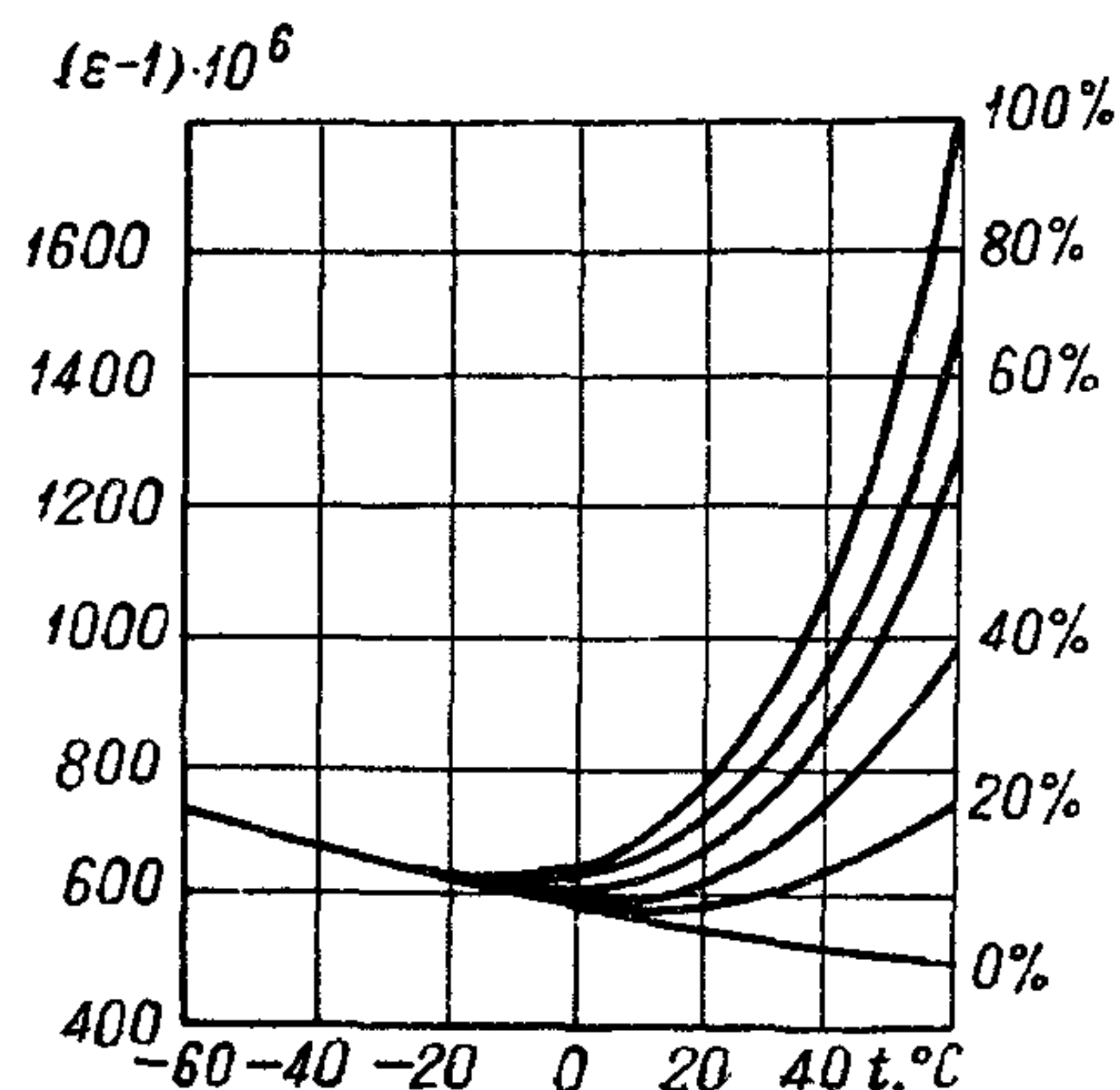


Рис. 148. Влияние температуры на диэлектрическую проницаемость воздуха при различных значениях относительной влажности.

вого воздушного конденсатора за счет изменения ϵ воздуха. При изменении влажности воздуха может также изменяться характер зависимости ϵ воздуха от температуры (рис. 148). Если для сухого воздуха ТКЕ при небольших отклонениях температуры от 20°C составляет $-1,82 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, то при влажности 60% в области температур $20-60^\circ \text{C}$ ТКЕ уже положителен и имеет среднее значение $+15 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Кроме того, за счет осаждения влаги на поверхности твердого диэлектрика увеличивается утечка и возрастает $\text{tg } \delta$ конденсатора. Поэтому образцовые воздушные конденсаторы надо герметизировать или использовать в сухом помещении.

Ц и л и н д р и ч е с к и е о б р а з ц о в ы е в о з д у ш н ы е к о н д е н с а т о р ы в ы с о к о г о н а п р я ж е н и я находят у нас применение в схеме моста Шеринга при напряжениях 10 и 35 кВ и значениях номинальной емкости соответственно 100 и 50 пф. Величину зазора в этих конденсаторах приходится выбирать из соображений об электрической прочности воздуха, тогда как в конденсаторах низкого напряжения она выбиралась только из конструктивных соображений. Для сухого воздуха

в однородном поле при зазорах порядка 1—10 мм амплитудное значение $E_{\text{пр}} = 3 \text{ кВ/мм}$. У поверхности внутреннего электрода, где напряженность поля достигает максимума, амплитудное значение $E_{\text{раб}}$ принимают равным $0,5 E_{\text{пр}}$ (действующее значение $E_{\text{раб}} \approx 1 \text{ кВ/мм}$; в конденсаторах плоского типа, где поле у краев сильнее отличается от однородного, $E_{\text{раб}} \approx 0,5 \div 0,6 \text{ кВ/мм}$). Отношение диаметра внешнего электрода к внутреннему обычно берут равным 2,2—2,7. Размеры воздушных конденсаторов такого типа достаточно велики, что видно из следующей таблицы:

$C, \text{ пф}$	$U_{\text{ном}}, \text{ кВ}$	Размеры, мм		Удельный объем, $\text{см}^3/\text{пф}$	Удельная энергия, дж/л
		диаметр	высота		
100	10	310	520	460	$1,1 \cdot 10^{-4}$
50	35	350	920	4380	$1,4 \cdot 10^{-4}$

В связи с этим при более высоких номинальных напряжениях конденсаторов такого типа приходится переходить на применение сжатого газа, позволяющее значительно повысить рабочую напряженность поля и уменьшить удельный объем конденсатора.

§ 58. Образцовый воздушный конденсатор с точно вычисляемым значением емкости

При изготовлении воздушных конденсаторов плоского или цилиндрического типа точное вычисление их емкости связано со значительными трудностями. Поэтому, когда требуется использовать такие конденсаторы в качестве образцовых, причем должно быть известно фактическое значение емкости с большой точностью, обычно приходится прибегать к измерению, при котором емкость испытуемого конденсатора сравнивается с известной величиной индуктивности или активного сопротивления при заданной частоте, которые являются исходными образцовыми мерами.

Возможность изготовления образцового конденсатора, емкость которого может быть вычислена с большой точностью, возникла после разработки теоремы Лампарда.¹ Согласно этой теореме, разделяя полый проводящий цилиндр, площадь поперечного сечения которого имеет симметрию в одной плоскости, на две пары подобных электродов и измеряя перекрестное значение емкостей этих электродов, мы получаем постоянное значение емкости на единицу длины, равное:

$$C_{\text{пор}} = \ln 2/4\pi^2 = 0,017557623 \text{ эл. ст. ед/см.}$$

¹ А. М. Thompson, D. G. Lampard. — «Nature», 1956, 177, 888. D. G. Lampard. — «Proceed. IEE», 1957, 104, 271.

Принимая скорость света равной 299 792,50 км/сек, получаем значение погонной емкости равное 0,019535485 пф/см. При этом форма поперечного сечения не имеет влияния на величину погонной емкости при условии, что соблюдается требование о симметрии. Например, мы можем составить такое сечение из четырех цилиндров, расположив их симметрично (рис. 149, а) и получая перекрестные емкости: $A - C$, равную C_1 и $B - D$, равную C_2 . При

строого симметричном расположении имеем: $C_1 = C_2 = C_0$. Небольшая асимметрия оказывает слабое влияние на величину средней емкости, так как в этом случае

$$\frac{C_1 + C_2}{2C_0} = 1 + \frac{\ln 2}{8} \left(\frac{\Delta C}{C_0} \right)^2 + \dots \quad (253)$$

При этом, если перекрестные емкости отличаются друг от друга, например на $1 \cdot 10^{-3}$, то ошибка в среднем значении, полученная при пренебрежении всеми членами высших порядков в уравнении (253), вносящими отличие от единицы, будет меньше $1 \cdot 10^{-7}$.

Используя теорему Лампарда, емкость конденсатора можно вычислить с большой точностью, измеряя длину электрода и умножая ее на постоянное значение погонной емкости. При этом для точной фиксации длины, определяющей емкость, можно применить идею «охранного кольца», отделяя концы цилиндра от его активной средней части изолирующими зазорами. Чтобы устранить влияние недостаточной точности толщины

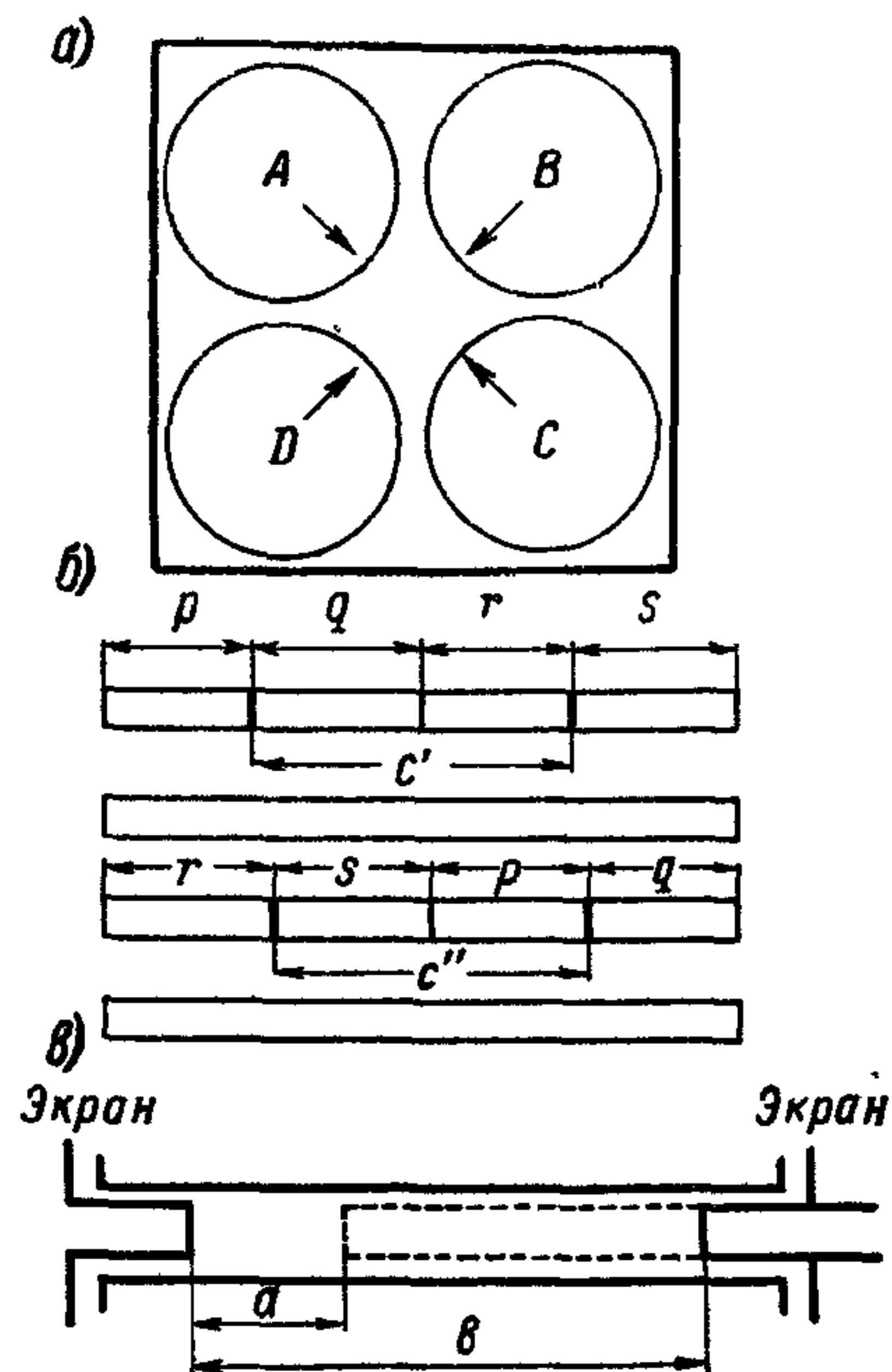


Рис. 149. Применение теоремы Лампарда для получения образцового конденсатора малой емкости: а — система из четырех симметрично расположенных цилиндров; б — цилиндры с двумя зазорами; в — конденсатор с выдвижным цилиндром.

зазора, было предложено использовать цилиндр с двумя зазорами, заполненными твердой изоляцией, распиленный пополам с тщательной шлифовкой торцов. Меняя положение половинок цилиндра (рис. 149, б), можно было получить два значения емкости:

$$C' = C_0 (q + r) \text{ и } C'' = C_0 (s + p).$$

Используя эти два значения, можно исключить неточность зазора.

Другой способ (рис. 149, в) — это изменение активной длины электрода выдвижением цилиндра из пространства между экранами. При этом определяется разность между двумя измерениями длины:

$$C_b - C_a = C_0 (b - a).$$

Применяя эти методы, Лампард и Томсон получали хорошую воспроизводимость результатов. Изготовленный ими опытный образцовый конденсатор емкостью в 1 нф дал сходимость расчета с результатами измерения емкости в единицах сопротивления и частоты, равную $0,001\%$. Отечественная конструкция образцового воздушного конденсатора емкостью 1 нф , выполненная на основе использования теоремы Лампарда, описана И. Н. Кротковым. В ней использованы цилиндры диаметром 25 мм и активной длиной 250 мм при зазоре 2 мм .

§ 59. Газонаполненные конденсаторы

В связи с повышенной электрической прочностью сжатого газа, для него можно повысить $E_{\text{раб}}$ в сравнении с воздухом при обычном давлении, а за счет этого снизить величину зазора при заданном значении высокого напряжения и резко уменьшить удельный объем на единицу емкости $v'_{\text{уд}}$, который в первом приближении, меняется прямо пропорционально квадрату величины зазора (§ 51). В однородном электрическом поле $E_{\text{пр}}$ газа возрастает пропорционально давлению, но в реальном конденсаторе, даже при тщательной полировке поверхности обкладок и тщательном закруглении их краев, поле не является вполне однородным. Поэтому возрастание электрической прочности с давлением замедляется в области больших давлений, и повышение давления газа выше $14\text{--}16\text{ ат}$ уже не дает существенного выигрыша в величине $E_{\text{пр}}$ (рис. 150). Для азота при таком давлении допускаемое амплитудное значение напряженности доходит до $8\text{--}10\text{ кВ/мм}$, что соответствует действующему значению $5,5\text{--}7\text{ кВ/мм}$.

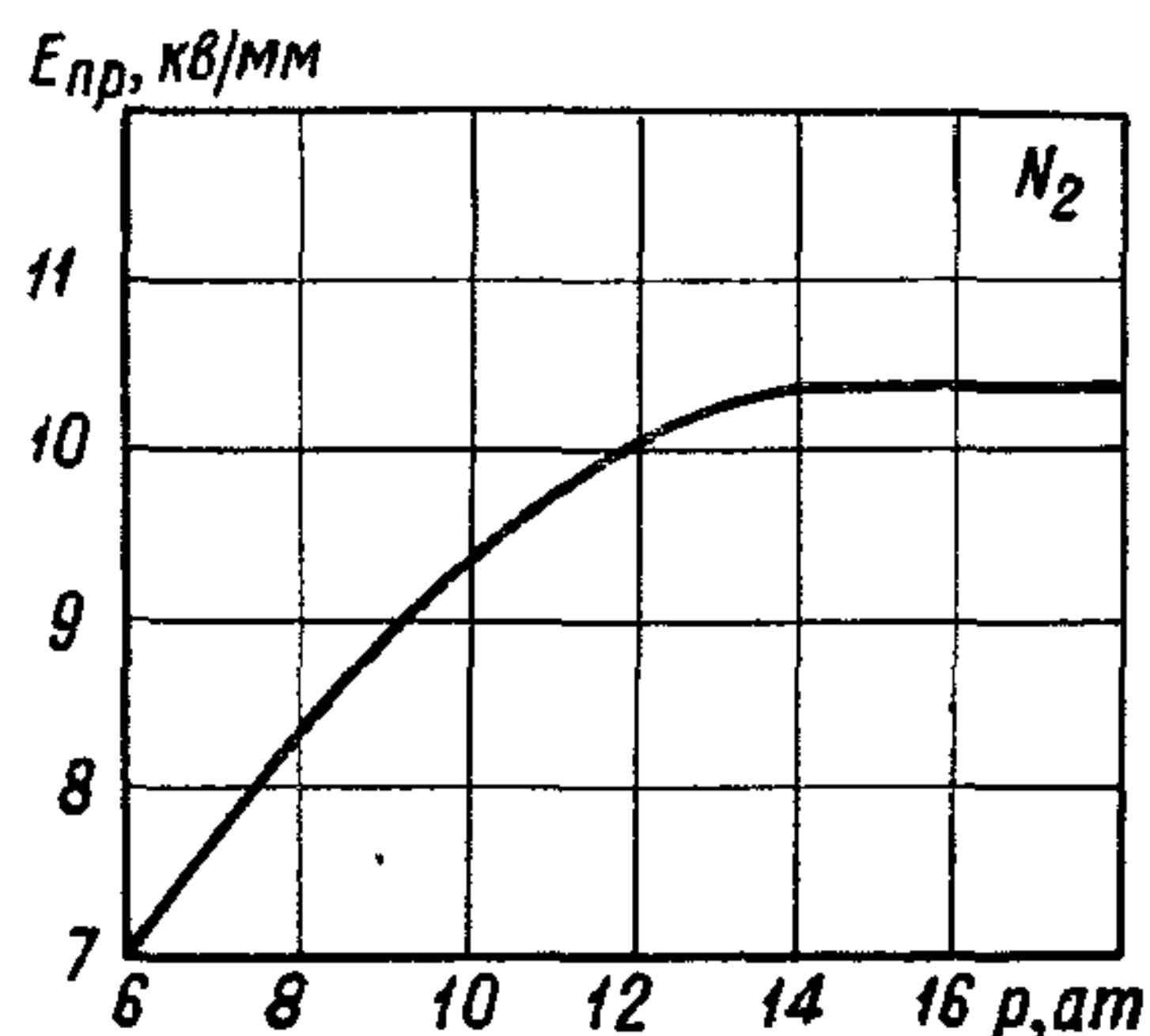


Рис. 150. Зависимость электрической прочности азота от давления в слабо неоднородном поле (зазор 30 мм).

Применение сжатого воздуха в конденсаторах нерационально, так как при этом резко увеличивается абсолютное содержание кислорода в единице объема, что вызывает опасность сильного окисления металла обкладок при разрядах или появлении короны. Обычно для наполнения конденсаторов применяют а з о т, реже у г л е к и с л о т у, а теперь и э л е г а з или другие электрически прочные газы (см. ниже).

Цилиндрические конденсаторы высокого напряжения небольшой емкости ($50\text{--}100\text{ нф}$, реже $150\text{--}200\text{ нф}$), наполненные сжатым азотом при давлении $12\text{--}15\text{ ат}$, находят применение в качестве образцов емкости при высоковольтных измерениях, в частности в одном из плечей моста Шеринга. Схема устройства нескольких конденсаторов такого типа на различные напряжения показана

на рис. 151. Подобные же конденсаторы применяются в емкостных делителях высокого напряжения.

Внутренний электрод обычно является обкладкой низкого напряжения, наружный — обкладкой высокого напряжения (рис. 151, а и б). Оба электрода помещены в изоляционный цилиндр из бакелизированной бумаги, внутри которого поддерживается

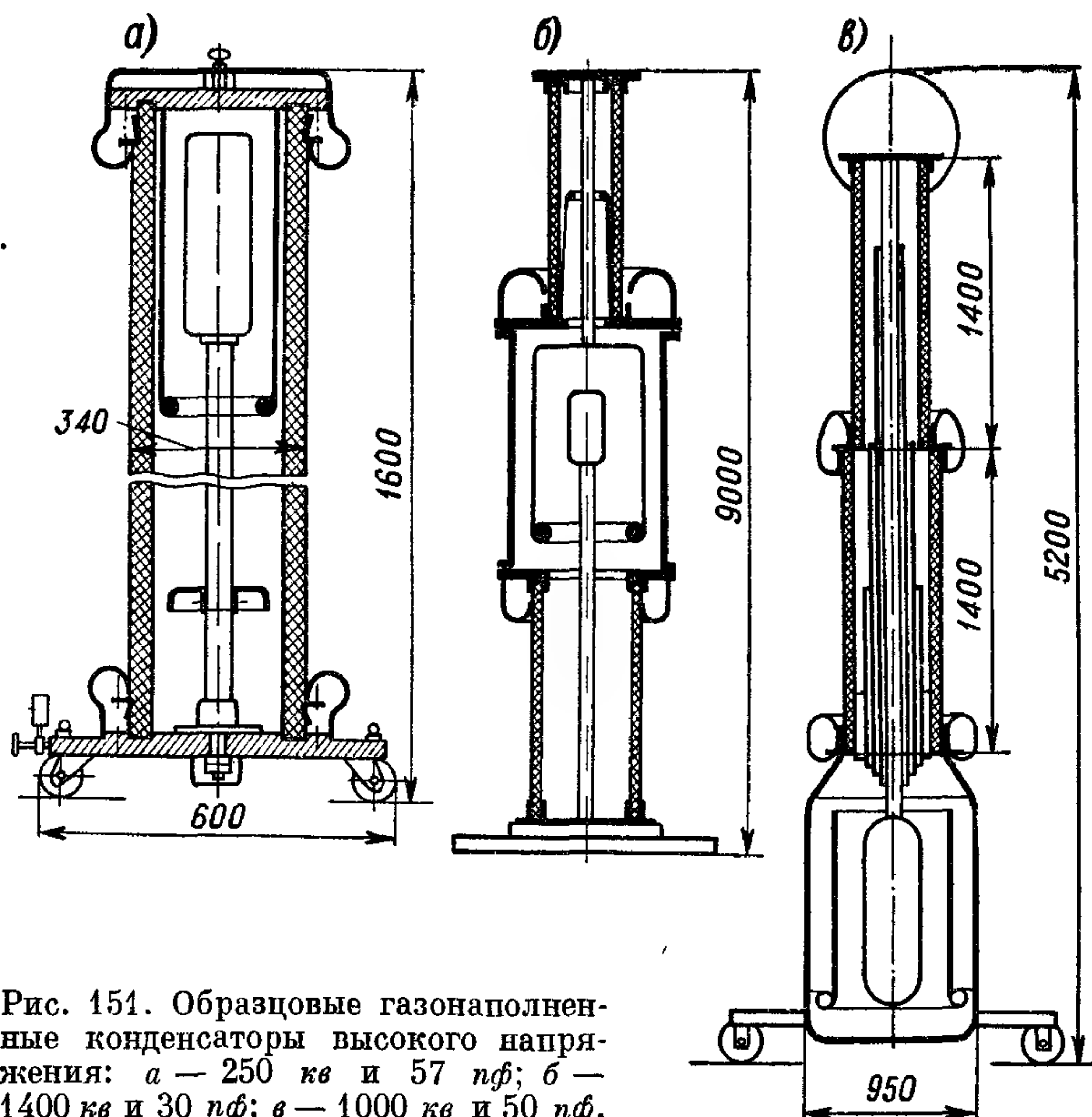


Рис. 151. Образцовые газонаполненные конденсаторы высокого напряжения: а — 250 кв и 57 пф; б — 1400 кв и 30 пф; в — 1000 кв и 50 пф.

повышенное давление. При особо высоких напряжениях рабочая часть конденсатора часто размещается в стальном кожухе (рис. 151, б и в); иногда при этом внутренний цилиндр используется как электрод высокого напряжения (рис. 151, в).

Высоту изоляционного цилиндра надо рассчитывать на перекрытие по его поверхности при нормальном давлении окружающего воздуха; поэтому высота конденсатора при высоком значении номинального напряжения оказывается много выше длины электродов и может достигать нескольких метров. Уплотнение конструкции осуществляется резиновыми прокладками и при тщательном его выполнении обеспечивает малую утечку газа. Тем не менее каждый конденсатор снабжается манометром для контроля давления. Подпитку конденсатора сжатым газом обычно приходится делать не чаще чем раз в год. Колебание давления на $\pm 0,2\%$ дает изме-

нение емкости порядка 0,01%. Сильное снижение давления опасно не только из-за изменения емкости, а также из-за снижения $E_{пр}$ газа, способного привести к пробое конденсатора. Колебания температуры вызывают изменения емкости конденсаторов данного типа как за счет изменения давления с температурой, так и за счет изменения размеров. Для современных конденсаторов при небольших изменениях температуры $TKE \approx +(10 \div 30) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Величина $\text{tg } \delta$ обычно гарантируется не выше $1 \cdot 10^{-4}$, а фактически — ниже $10^{-5} \div 10^{-6}$ (частота 50 гц). Если конденсатор предназначается для работы на открытом воздухе, а не в закрытых помещениях, как обычно, то вместо бакелизированной бумаги для изготовления изоляционного корпуса используется фарфор.

Некоторые данные об образцовых конденсаторах данного типа приведены в табл. 12.

Таблица 12

Некоторые характеристики образцовых газонаполненных конденсаторов

$C_{\text{ном}},$ пф	$U_{\text{ном}},$ кв	Высота, м	Вес, кг	Энергия, дж	Удельная энергия, дж/л, $\times 10^3$	Газ	Страна изготов- ления
100	100	0,76	—	0,5	6,5	N_2	СССР
57	250	1,60	—	1,8	13,0	N_2	СССР
50	500	2,79	—	6,25	9,5	N_2	ФРГ
50	750	5,88	4500	14,1	1,8	SF_6	Канада
50	1000	5,20	—	25,0	6,0	$N_2 + CCl_2F_2$	ГДР (опытн.)
30	1400	9,0	6000	29,3	1,8	N_2	ФРГ

Повышенную электрическую прочность газовой изоляции можно получить не только увеличением давления, но и п о д б о р о м с о с т а в а г а з а. Повышенной электрической прочностью обладают так называемые э л е к т р о о т р и ц а т е л ь н ы е газы, в молекулах которых содержатся атомы галоидов: Cl, Br, F, J. Эти атомы способны присоединять свободные электроны, присутствующие в газе, превращая молекулы газа в отрицательные ионы. Если при пробое обычных газов ударная ионизация возникает за счет накопления энергии движущимися в газе электронами, то в электроотрицательных газах агентами ионизации служат значительно менее подвижные отрицательные ионы, что изменяет величину коэффициента ионизации и повышает электрическую прочность газа. Некоторые сведения о свойствах ряда электрически прочных газов в сравнении с азотом приведены в табл. 13.

В СССР Б. М. Гохбергом был предложен для использования в качестве электрически прочного газа гексафторид серы SF_6 , который получил название э л е г а з. В однородном поле его $E_{пр}$ в 2,5 раза выше, чем у азота (рис. 152, а); элегаз нетоксичен, термически стоек до 800°C и химически инертен. При температуре -50°C критическое давление для элегаза составляет 2,5 ат, при

—20° С — порядка 10 ат, а при комнатной температуре его можно сжимать до нескольких десятков атмосфер. Проводились удачные опыты по замене азота в конденсаторах высокого напряжения элегазом. При этом можно было или значительно поднять пробивное и рабочее напряжение конденсатора, или же при заданном $U_{\text{раб}}$ снизить давление с 12—15 ат до 6—8 ат.

Таблица 13

Некоторые свойства электрически прочных газов в сравнении с азотом

Название газа	Химическая формула	$t_{\text{пл}}, ^\circ\text{С}$	$t_{\text{кип}}, ^\circ\text{С}$	Плотность, г/л	ϵ	$\frac{E_{\text{пр}} \text{ газа}}{E_{\text{пр}} \text{ N}_2}$
Азот	N_2	—240	—196	1.25	1,0006	1,0
Гексафторид серы	SF_6	—	—64	6,50	—	2,5
Дихлордифторметан	CCl_2F_2	—158	—30	—	1,0016	2,4
Перфторэтан	C_2F_6	—100	—77	4,56	—	2,0
Перфторпропан	C_3F_8	—160	—36,7	—	—	2,2
Перфторциклобутан	C_4F_8	—48	—6	9,48	1,0034	3,0
Перфторбутан	C_4F_{10}	—80	—2	—	—	2,8

Примечание. Плотность газов указана при 0° С и давлении 760 мм рт. ст.

Следует иметь в виду, что при резко неоднородном поле (например, при электродах игла — плоскость) зависимость $E_{\text{пр}}$ элегаза от давления (рис. 152, б) заметно отличается от той, которая была получена для однородного поля (рис. 152, а). В области давлений менее некоторого критического значения $U_{\text{пр}}$ проходит через максимум и в отличие от $U_{\text{пр}}$ для азота может быть много больше напряжения короны. В этой области пробой при импульсах может наступать при значительно меньших напряжениях, чем при переменном напряжении технической частоты. Поэтому следует принимать меры к тому, чтобы поле между обкладками конденсатора, заполняемого элегазом или иным электроотрицательным газом, было бы возможно ближе к однородному.

Дихлордифторметан CCl_2F_2 , известный под названием фреон, менее удобен для применения в конденсаторах, чем элегаз. Он сжижается при температуре около —30° С, а при комнатной температуре его можно сжать лишь до давления порядка нескольких атмосфер; только при 40° С упругость его паров достигает 10 ат.

За рубежом подверглись исследованию и другие электрически прочные газы, приведенные в табл. 13. Имеются указания, что перфторэтан C_2F_6 и перфторциклобутан C_4F_8 нашли применение в сухих трансформаторах. Можно думать, что ведутся опыты и по использованию подобных газов в конденсаторостроении.

Сообщалось также об испытаниях перхлорфторида ClO_3F , показавшего значения $E_{\text{пр}}$ выше, чем у элегаза. Кроме того,

этот газ при частоте 60 гц не снижает $E_{пр}$ в таких условиях радиации, которые резко ухудшают электрическую прочность элегаза и азота. Недостатком ClO_2F являются его сильные окислительные свойства, что заставляет осторожно подходить к выбору материалов, работающих в контакте с этим газом.

Высокой электрической прочностью (в 6,3 раза выше азота) обладают пары четыреххлористого углерода CCl_4 , но это вещество при комнатной температуре является жидкостью с упругостью паров, равной всего лишь 0,1 ат. При насыщении воздуха (или азота) парами CCl_4 можно получать повышение $E_{пр}$ до 2—2,5 раз. Однако при действии разрядов CCl_4 способен отщеплять свободный хлор, что ограничивает возможность его применения.

Газонаполненные конденсаторы могут также применяться не только в качестве образцов емкости при высоком напряжении низкой частоты, но и как контурные конденсаторы высокого напряжения при высоких частотах, порядка 10^5 — 10^6 гц. В этом случае требуются емкости порядка сотен или тысяч пикофарад и пиковые напряжения до нескольких десятков киловольт. Преимуществом сжатого газа при таком его применении является сочетание достаточно высокой $E_{пр}$ с малым $\text{tg } \delta$ и стабильностью емкости. Малая величина ϵ не препятствует в этом случае получению высоких значений удельной реактивной мощности [§ 53, формула (242)].

В СССР Б. М. Гохберг и Н. М. Рейнов разработали конструкцию газонаполненного контурного конденсатора с плоскими круглыми пластинами и выводным изолятором из двух стеклянных полусфер (рис. 153, а). Подобные же конденсаторы изготовлялись мелкими сериями для применения в контурах мощных радиопередающих устройств, а также, в меньшей степени, для контуров высокочастотных электротермических установок. Номинальная емкость конденсаторов составляла от нескольких сотен до нескольких тысяч пикофарад при испытательном напряжении до 30—40 кв (50 гц), реактивная мощность конденсаторов — до 1000—1500 квар

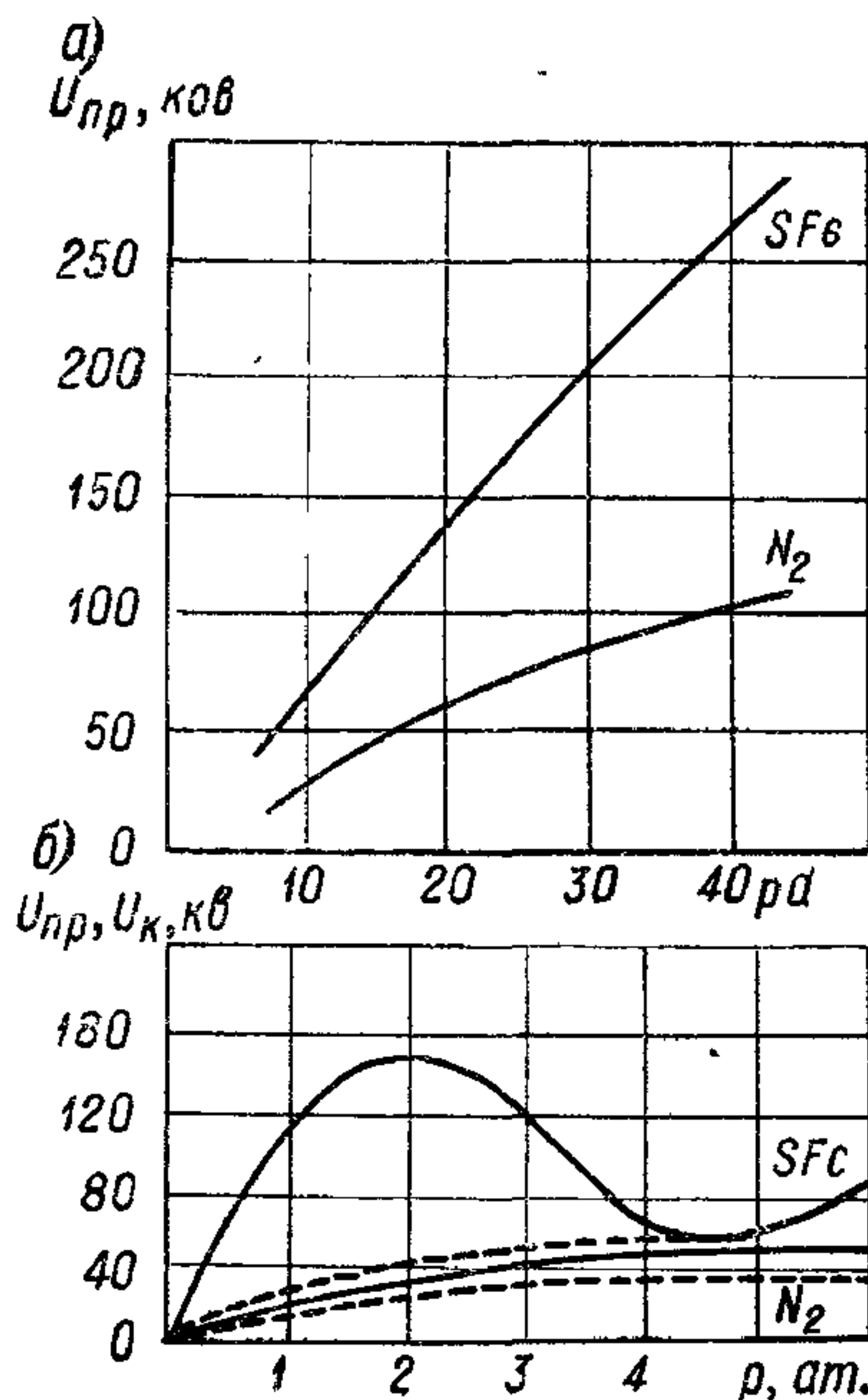


Рис. 152. Сравнение электрической прочности азота и элегаза: а — зависимость пробивного напряжения от произведения зазора на давление ($\text{мм} \cdot \text{атм}$) в однородном поле; б — зависимость пробивного напряжения (сплошные линии) и напряжения начала короны (прерывистые линии) от давления для резко неоднородного поля.

при частотах $0,1—1\text{ Мгц}$. В этой области частот удельная реактивная мощность достигала максимума порядка $80—150\text{ вар/см}^3$ (см. кривую 2 на рис. 142, б). Величина $\operatorname{tg} \delta$ при рабочих частотах составляла $0,5 \div 0,7 \cdot 10^{-4}$. При давлении азота $14—16\text{ ат}$ испытательная напряженность, по которой выбиралась величина зазора между пластинами, равнялась указанному выше значению $E_{\text{и}} =$

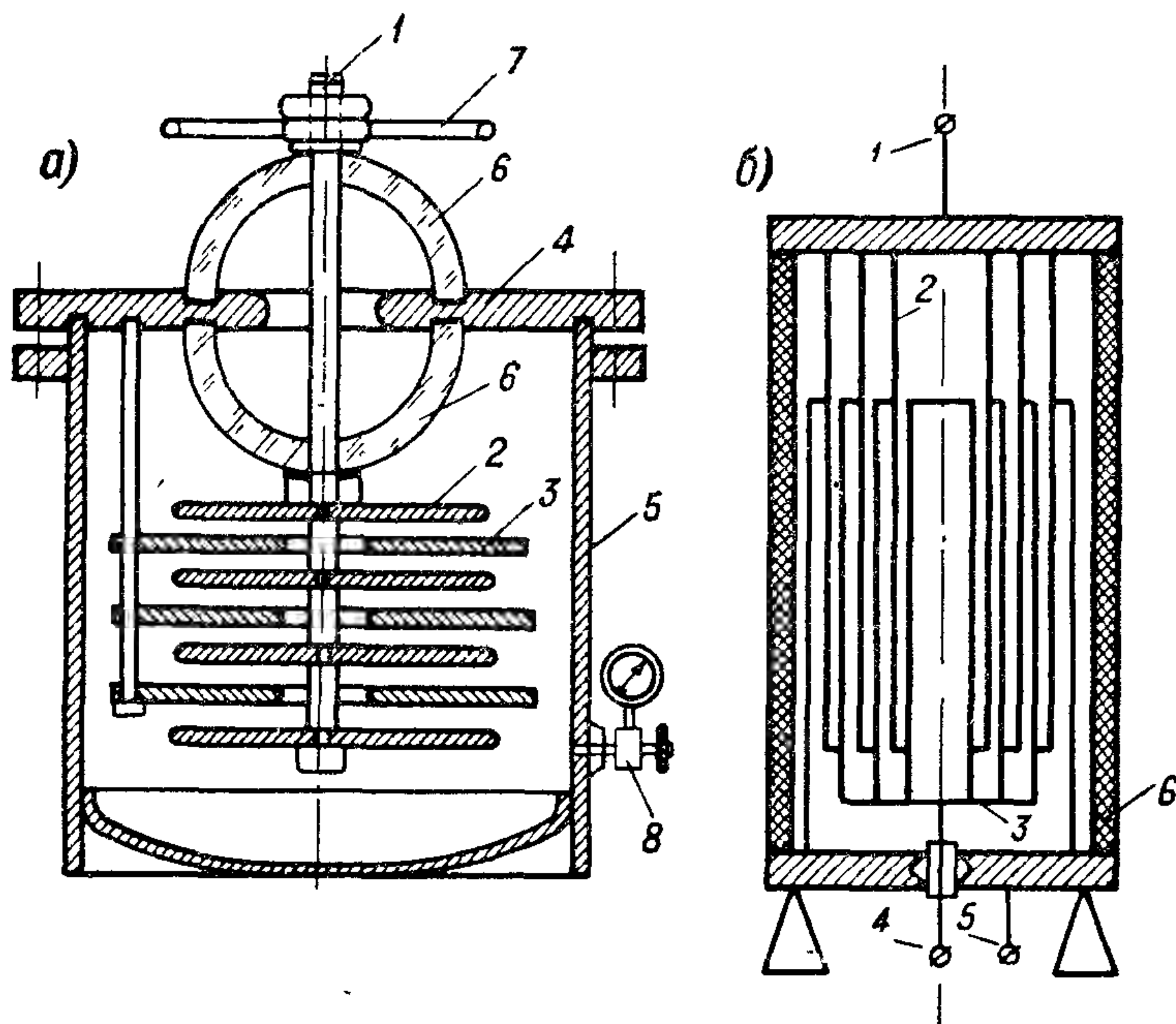


Рис. 153. Газонаполненные контурные конденсаторы: а — схема устройства конденсатора плоского типа.

1 — высоковольтный ввод; 2 — пластины высокого напряжения; 3 — пластины низкого напряжения; 4 — крышка; 5 — корпус; 6 — стеклянные полусферы; 7 — экран для выравнивания поля; 8 — манометр и вентиль для выпуска газа;

б — схема устройства цилиндрического конденсатора.

1 — крышка (вывод высокого напряжения); 2 — обкладки высокого напряжения; 3 — обкладки низкого напряжения; 4 — вывод низкого напряжения; 5 — экран; 6 — изоляционный корпус.

$= 8 \div 10\text{ кВ/мм}$ (амплитуда). Величина $E_{\text{раб}}$ определялась условиями нагрева конденсатора. В настоящее время эти конденсаторы вытеснены у нас вакуумными и высоковольтными керамическими конденсаторами.

За рубежом отдельные фирмы продолжают изготовление конденсаторов этого типа, например фирма «Лапп» (США). Согласно рекламным данным фирмы, конденсаторы изготавливаются с емкостью до $30\,000\text{ пф}$ при испытательном напряжении до 85 кВ (амплитуда), при частоте 1 Мгц рабочий ток до 400 а . Наряду с плоской конструкцией некоторые фирмы применяют также цилиндрическую (рис. 153, б). Имеются указания, что в модернизированных

конструкциях таких конденсаторов используются электрически прочные газы.

Недостатками газонаполненных конденсаторов контурного типа являются: а) относительно тяжелая конструкция, связанная с необходимостью применять массивный корпус, рассчитываемый на большие механические усилия (при внутренней поверхности корпуса порядка нескольких тысяч квадратных сантиметров общее усилие, действующее на эту поверхность, достигает величины порядка десятков тонн); б) необходимость периодической подпитки газом в виду его постепенной утечки; в) недостаточная устойчивость тяжелой конструкции при перевозках; г) повышенные потери в металлических частях, ввиду относительно большого веса металла в конструкции.

Керамические конденсаторы легче газонаполненных и имеют простую конструкцию, но у них заметно увеличен ТКЕ, а потому они не могут применяться в тех случаях, когда нужна большая стабильность частоты контура. В основном керамические конденсаторы заменили газонаполненные в электротермических устройствах. Для радиопередатчиков вместо газонаполненных конденсаторов преимущественно применяются вакуумные конденсаторы.

§ 60. Вакуумные конденсаторы

При малых давлениях газа, т. е. при высоком вакууме, наблюдается резкое возрастание электрической прочности (§ 31, рис. 69). Это позволяет использовать вакуум в качестве изоляции для устройств высокого напряжения, в частности при изготовлении высоковольтных высокочастотных конденсаторов.

Ионизация в газе перестает влиять на механизм пробоя, когда длина свободного пробега электронов значительно превышает величину зазора между электродами; при зазорах порядка 1—10 мм такое состояние достигается при остаточном давлении менее 10^{-4} мм рт. ст. При этом удается достигать значений порядка 60—70 кВ/мм. Пробивное напряжение в вакууме возрастает с величиной зазора d не прямолинейно, а замедленно, подчиняясь эмпирической формуле

$$U_{\text{пр}} = Kd^{0.5}, \quad (254)$$

где K — константа, зависящая от материала электродов и состояния их поверхности. В одном из опытов с тщательно обработанными электродами из разных материалов при зазоре 1 мм было найдено, что если пробивное напряжение для медных электродов принять за 1, то для других металлов оно составляет: алюминий — 1,10, монель-металл — 1,52, никель — 2,59, сталь — 3,31.

В соответствии с формулой (254) величина $E_{\text{пр}}$ в вакууме должна снижаться при увеличении зазора. Для повышения $E_{\text{пр}}$ применяется тщательная полировка электродов с последующим удалением

следов полировочной пасты промывкой и вакуумной обработкой. Дополнительное повышение $E_{пр}$ можно получить обработкой электродов в вакууме газовым разрядом. При этом удаляются газы, адсорбированные на поверхности электродов, сглаживаются неровности поверхности.

При изготовлении вакуумных конденсаторов применяют цилиндрические электроды (обкладки) с зазором $0,5—4,5$ мм; амплитудное значение $E_{ис}$ доходит при этом до $15—20$ кВ/мм. Поскольку для таких конденсаторов обычно $E_{ис} = (1,2—1,4) E_{раб}$, получаем эффективное значение $E_{раб}$ по величине электрической прочности

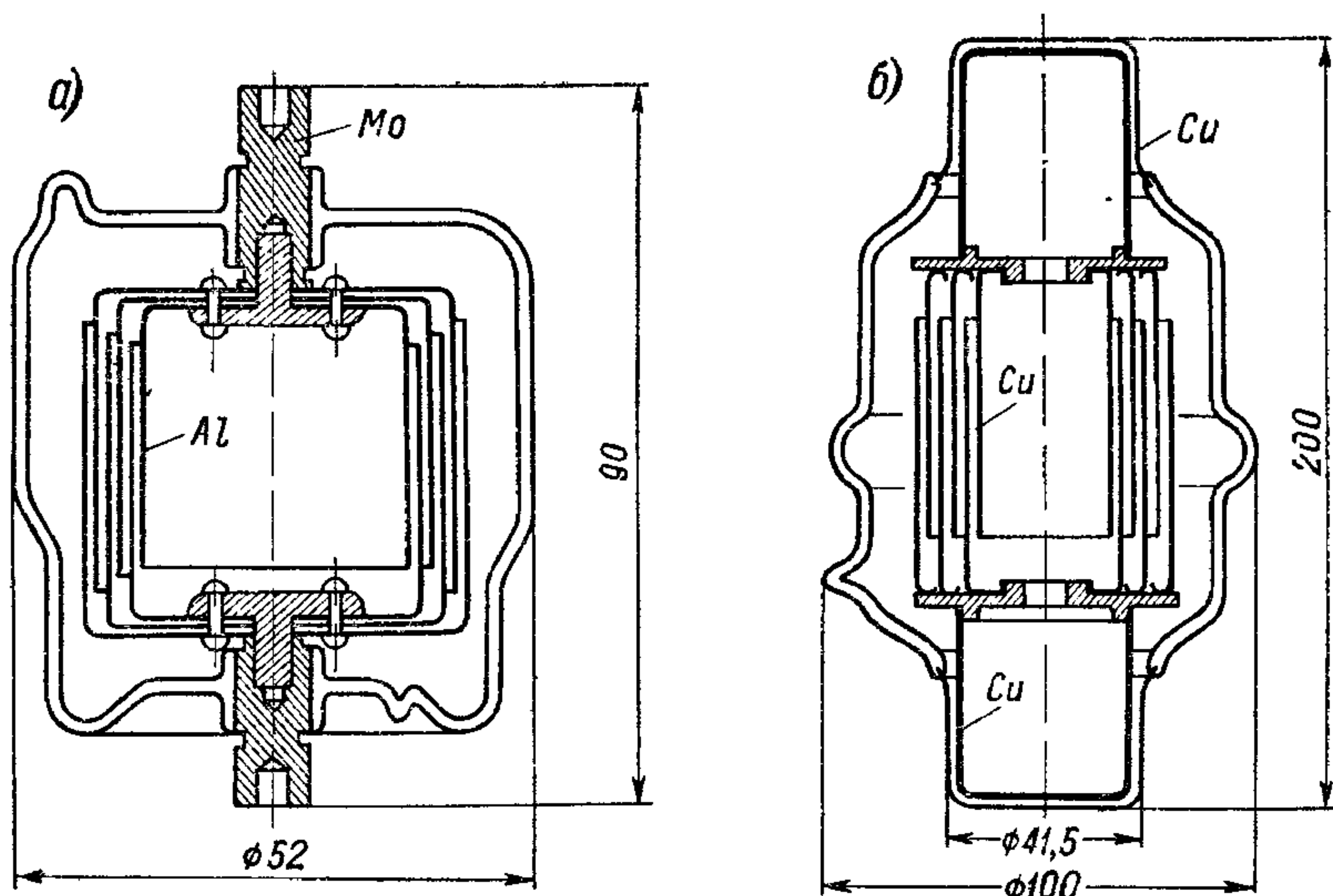


Рис. 154. Вакуумные конденсаторы: а — тип ВМ: 100 пф, 10 кВ, 12 а, 25 МГц. б — тип К61-1: 150 пф, 25 кВ, 30 МГц.

порядка $8—10$ кВ/мм. Практически величину $E_{раб}$ приходится устанавливать при высокой частоте по условиям нагрева.

Два варианта отечественной конструкции вакуумных конденсаторов показаны на рис. 154. Основной конструкции являются две системы обкладок в виде ряда стаканчиков, вдвинутых в зазоры между одноименными обкладками противоположной системы; каждая система обкладок соединена с выводом в виде массивного стержня (рис. 154, а) или в виде полого цилиндра (рис. 154, б); к выводам припаяна стеклянная оболочка, охватывающая систему обкладок. При молибденовых выводах можно подобрать стекло оболочки с близким коэффициентом линейного расширения; при медных выводах этого сделать не удастся и приходится спаивать стекло с тонкостенным медным отводом от вывода, чтобы исключить опасные механические напряжения в месте спая (рис. 154, б). Внутри конденсатора наличие высокого вакуума (обычно добиваются остаточного давления порядка 10^{-6} мм рт. ст.) обеспечи-

дает высокую электрическую прочность; снаружи конденсатор окружен воздухом при обычном давлении или даже разряженным воздухом при использовании конденсатора в самолетной аппаратуре; поэтому длину стеклянной оболочки конденсатора обычно рассчитывают исходя из допускаемого значения напряженности $0,4\text{--}0,5 \text{ кВ/мм}$ (амплитуда), что соответствует давлению окружающего воздуха 400 мм рт. ст.

Для удаления газов, содержащихся внутри металлических частей конденсатора, после сборки производится длительный прогрев ($1,5\text{--}3 \text{ ч}$) при откачке при температуре 500°С . Готовые конденсаторы тренируют, постепенно увеличивая напряжение, прикладываемое к конденсатору, до достижения испытательного значения. На промежуточных ступенях напряжения происходят отдельные разряды, исчезающие при выдержке на данной ступени. В конце тренировки при номинальном $U_{ис}$ (50 гц) разрядов не должно быть. Кроме того, каждый конденсатор проверяют на нагрев при номинальном токе и рабочей частоте.

Рабочее напряжение конденсатора при высокой частоте определяется допустимым нагревом, и его приходится снижать при увеличении частоты (рис. 155); температуру перегрева на поверхности вакуумного конденсатора обычно допускают равной $80\text{--}100^\circ \text{С}$ ($t_{\text{макс}}$ до $150\text{--}170^\circ \text{С}$).

Основные характеристики современных вакуумных конденсаторов: пределы номинальной емкости: от нескольких пикофарад до тысяч пикофарад; испытательные напряжения (амплитуда): от нескольких киловольт до десятков киловольт; рабочий ток при радиочастоте: от десятков до сотен ампер; удельная реактивная мощность: от $200\text{--}300$ до 1000 вар/см^3 ; тангенс угла потерь при 1 Мгц : не более $3 \cdot 10^{-4}$ (фактически обычно менее $1 \cdot 10^{-4}$); температурный коэффициент емкости: $+(20 \div 30) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; изменение емкости при вибрациях: менее $0,1\%$.

Некоторые данные о вакуумных конденсаторах постоянной емкости, изготовляемых в СССР, приведены ниже.

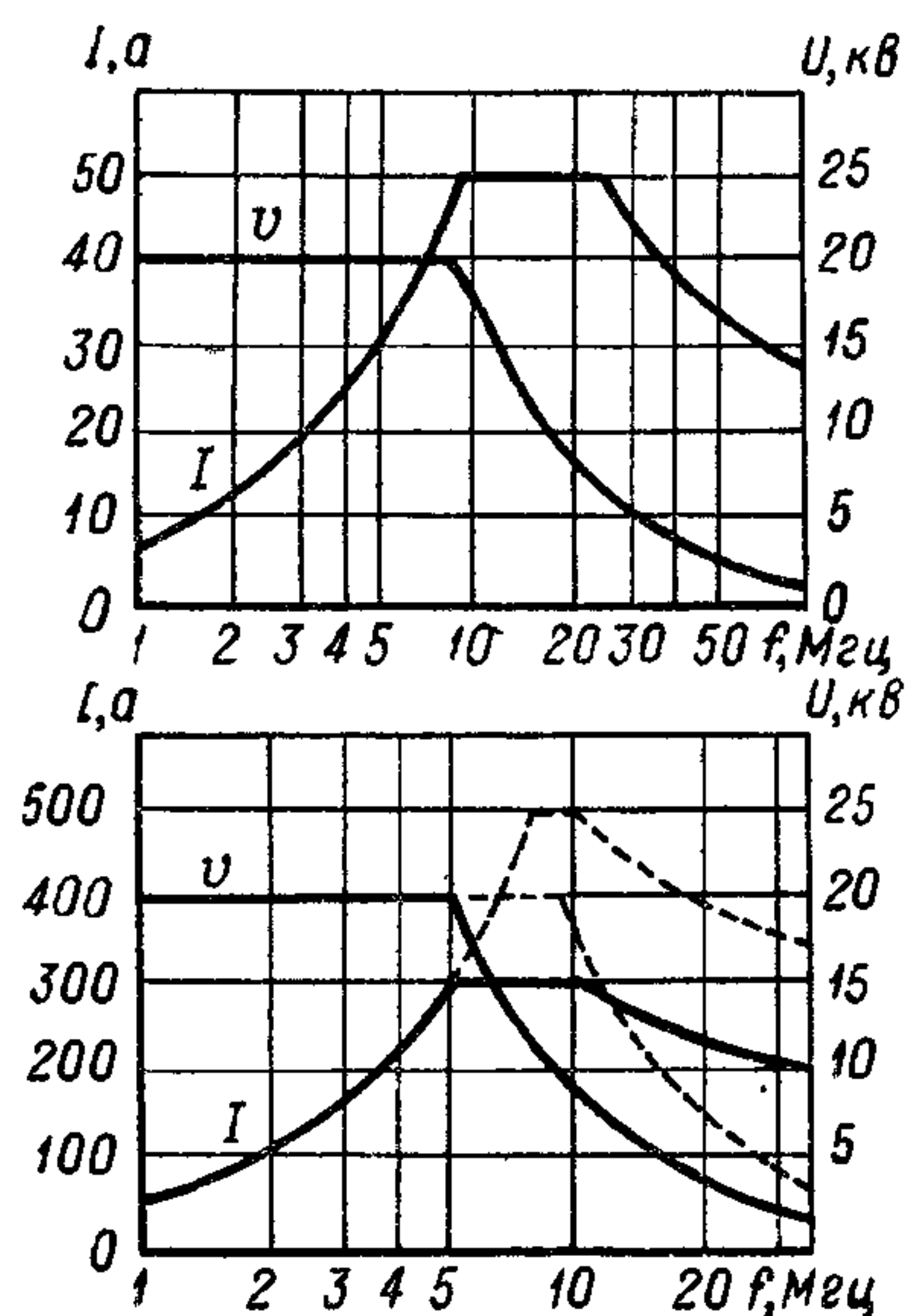


Рис. 155. Зависимость допускаемых значений напряжения и тока для вакуумных конденсаторов «Тесла» (ЧССР). Сплошные кривые — естественное воздушное охлаждение; прерывистые — форсированное охлаждение с помощью вентилятора. Вверху — конденсатор 70 пф на 25 кВ ; внизу — 500 пф на 20 кВ .

В отечественной практике для изготовления электродов обычно используют медь или алюминий. За рубежом некоторые фирмы применяют также никель и даже тантал. Все же наиболее употребительным металлом является медь, обеспечивающая получение малого сопротивления электродов (являющегося основной причиной потерь в вакуумных конденсаторах), а также обладающая высокой теплопроводностью.

Тип	$C_{\text{ном}}, \text{нф}$	$U_{\text{ампл}}, \text{кв}$	$I_{\text{вч}}, \text{эфф}, \text{а}$	$f_{\text{макс}}, \text{Мгц}$	Размеры, мм		Вес, г
					D	L	
K61-3	25—500	5	25	30	46—58	95	200—340
BM	12,5—200	10	12	30	42—62	90	80—160
K61-6	15—300	10	25	30	50—59	92	200—300
K61-7	50—300	10	50	30	62—72	108	350—450
B	25—300	15	20	25	65—85	150	260—400
K61-2	500—1000	16	125	3	105—120	235	1400—2400
BB	12,5—200	25	25	30	90—128	145	330—700
K61-1	10—300	25	50	30	76—135	170—200	450—1450
K61-5	50—400	25	100	30	118	205	1750—2100
K61-9	50—500	25	100	30	70—118	124—162	700—2500
K61-4	50—400	45	75	30	105—160	256	1150—2700

В отличие от газонаполненных конденсаторов вакуумные конденсаторы имеют более простую и легкую конструкцию (стенки корпуса испытывают удельное давление только в 1 кг/см^2 вместо $14—16 \text{ кг/см}^2$), имеют меньшие потери, малый ТКЕ и более устойчивы к вибрациям. Наибольшая удельная реактивная мощность достигается в диапазоне частот $1—10 \text{ Мгц}$ (см. рис. 69), причем она значительно выше, чем у газонаполненных конденсаторов. Недостатком вакуумных конденсаторов являлась недостаточная механическая прочность стеклянной оболочки. Ряд зарубежных фирм начал применять в производстве вакуумных конденсаторов вместо стеклянной колбы керамическую трубку, что резко улучшило механические характеристики конденсаторов. Разработка вакуумного конденсатора в керамической оболочке успешно выполнена и отечественным конденсаторостроением. Для конденсаторов такого типа оказалось возможным повысить верхний предел рабочей температуры.

Вакуумные конденсаторы представляют собой прогрессивный тип мощного высокочастотного конденсатора, нашедшего себе широкое применение в области коротких волн. Освоение производства таких конденсаторов с относительно большими емкостями, порядка тысяч пикофард, позволяет распространить их использование и на область более длинных волн, где основное применение имели газонаполненные контурные конденсаторы.

§ 61. Конденсаторы с жидким диэлектриком

Жидкий диэлектрик, так же как и газообразный, не может служить опорой для обкладок конденсатора. Поэтому в конструктивном отношении конденсаторы с жидким диэлектриком подобны конденсаторам с газообразным диэлектриком: они также должны иметь две системы относительно толстых и механически прочных обкладок, зазор между которыми определяется дополнительной твердой изоляцией. В отличие от воздушных конденсаторов конденсаторы с жидким диэлектриком должны иметь герметически закрытый корпус, предохраняющий жидкость, залитую в конденсатор, от попадания в нее влаги и пыли из окружающего воздуха. По существу конденсатор с жидким диэлектриком представляет собой воздушный конденсатор, помещенный в металлический корпус и залитый в нем жидким диэлектриком.

Преимуществом жидкого диэлектрика в сравнении с воздухом является повышенная диэлектрическая проницаемость, позволяющая в несколько раз увеличить емкость конденсатора, а также повышенная электрическая прочность, достигающая при тщательной очистке и сушке жидкости значений порядка 20—25 кВ/мм. Однако эти цифры относятся к технической частоте (50 Гц), кратковременному воздействию напряжения и малой площади электродов. Учитывая явление старения жидкого диэлектрика при длительном воздействии электрического поля и повышенной температуры, снижение электрической прочности при повышении частоты (переход от 50 Гц к 0,5 МГц дает, например, снижение прочности масла на 40%) и уменьшение $E_{пр}$ при увеличении площади электродов, приходится резко снижать допустимые значения $E_{раб}$ для жидкого диэлектрика в сравнении с указанными выше значениями $E_{пр}$. При частоте порядка 0,2—0,3 МГц фактическое значение $E_{раб}$ в опытных маслонаполненных конденсаторах составляло около 1,3 кВ/мм. Это выше, чем допускается для воздушных конденсаторов, но уже много ниже, чем в газонаполненных или вакуумных. Следует отметить, что величина угла потерь в жидкостях, имеющая нижний предел порядка $1 \cdot 10^{-4}$, значительно превышает угол потерь газовой изоляции, который может быть получен порядка 10^{-5} и даже менее. Существенным недостатком жидких диэлектриков является также высокий ТКЕ, составляющий $(800 \div 1000) \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ для неполярных жидкостей и $(2000 \div 3000) \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ для полярных (напомним, что для сухого воздуха $\text{ТКЕ} = -2 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$); для полярных жидкостей характерна также заметная зависимость ϵ от частоты. В связи с этим конденсаторы с жидким диэлектриком мало пригодны для использования в стабильных контурах радиоустройств; по существу, конденсатор с жидким диэлектриком можно рекомендовать только для применения в контурах электротермических устройств, где к стабильности частоты не предъявляется высоких требований.

Конденсаторы такого типа были разработаны фирмой «Дженерал Электрик» (США) для замены слюдяных мощных конденсаторов (рис. 156), применявшихся ранее в контурах установок для нагрева металла (плавка, термическая обработка). Для заливки этих конденсаторов была использована полярная жидкость, получившая название **л е к т р о н о л**.

Преимуществом полярных жидкостей перед обычным неполярным жидким диэлектриком — нефтяным маслом ($\epsilon = 2 \div 2,2$)

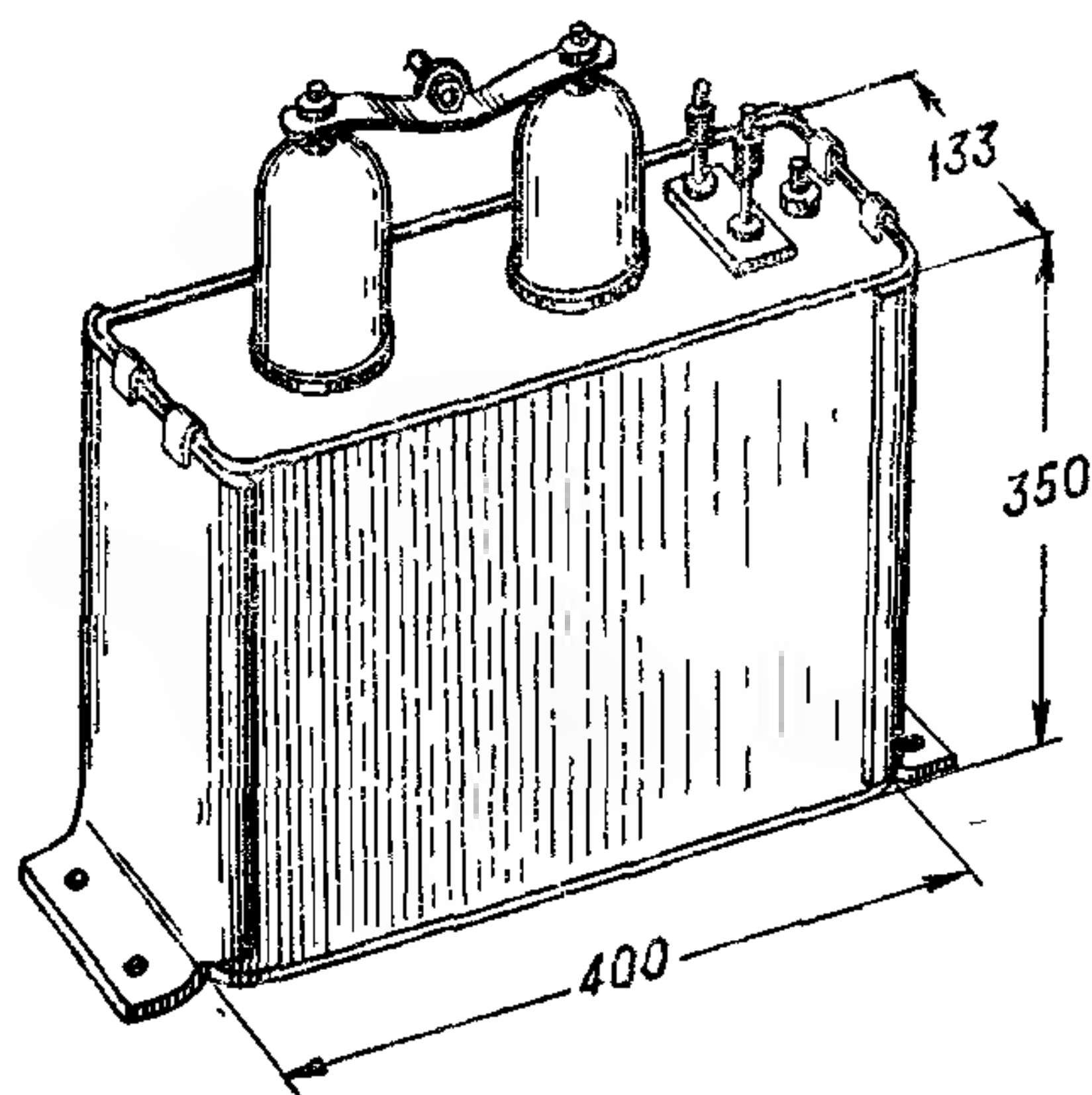


Рис. 156. Лектроноловый конденсатор: 5600 пф, 9 кв, 540 кГц (США).

является их повышенная диэлектрическая проницаемость, но возможность их использования при высоких частотах ограничивается повышенным углом потерь. Общий характер зависимости ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ полярной жидкости от частоты, приведенный на рис. 157, показывает, что в определенной области частот угол потерь проходит через минимум; при этом величина ϵ еще сохраняет повышенное значение; при дальнейшем увеличении частоты после перехода через дипольный максимум угол потерь снова снижается, но при этом снижается и величина ϵ , что делает использование жидкого диэлект-

рика при таких частотах уже нерациональным. Для применения в высокочастотных контурных конденсаторах требовалось подобрать такой полярный жидкий диэлектрик, который имел бы минимум угла потерь в области требуемых рабочих частот. Применительно к контурам электротермических установок эта область лежит в пределах 0,1—1 МГц. Лектронол удовлетворяет этим условиям и при температурах порядка 25—75° С имеет в указанной области частот малый $\operatorname{tg} \delta$. По своему составу он представляет собой **д и б у т и л с е б а ц и н а т**, т. е. двойной эфир себаценовой кислоты $\text{COOH}-(\text{CH}_2)_8-\text{COOH}$ и бутилового спирта $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$. Лектронол имеет следующие характеристики:

Плотность	0,939 г/см ³
Температура вспышки	180° С
Температура застывания	— 8° С
Диэлектрическая проницаемость	4,2 — 4,3
Температурный коэффициент (в области положительных температур)	— $2350 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$
Тангенс угла потерь при 0,1—1 МГц и 25—75° С	$0,7 — 1 \cdot 10^{-4}$
Пробивная напряженность при зазоре 2,5 мм, температуре 25° С и частоте 60 Гц	16 кв/мм
То же, при зазоре 0,9 мм, частоте 0,5 МГц и 25° С	8,4 кв/мм
То же, при зазоре 0,9 мм, частоте 0,5 МГц и 100° С	7,8 кв/мм

В качестве твердого диэлектрика для крепления пластин был использован микалекс, пластины изготовлены из алюминия. Система пластин низкого напряжения непосредственно соединена с охлаждающим змеевиком. Корпус конденсатора, изготовленный из немагнитного металла, полностью заполнен электронолом и герметизирован, гибкость боковых стенок достаточна для компенсации теплового расширения жидкости. На крышке установлены два проходных изолятора, причем выводы соединены параллельно, чтобы в два раза снизить рабочий ток, приходящийся на каждый изолятор. Вывод низкого напряжения присоединен к корпусу. Изоляторы полые и внутри заполнены жидкостью для улучшения их охлаждения. Расход охлаждающей воды 2,3 л/мин при перегреве воды 3° С.

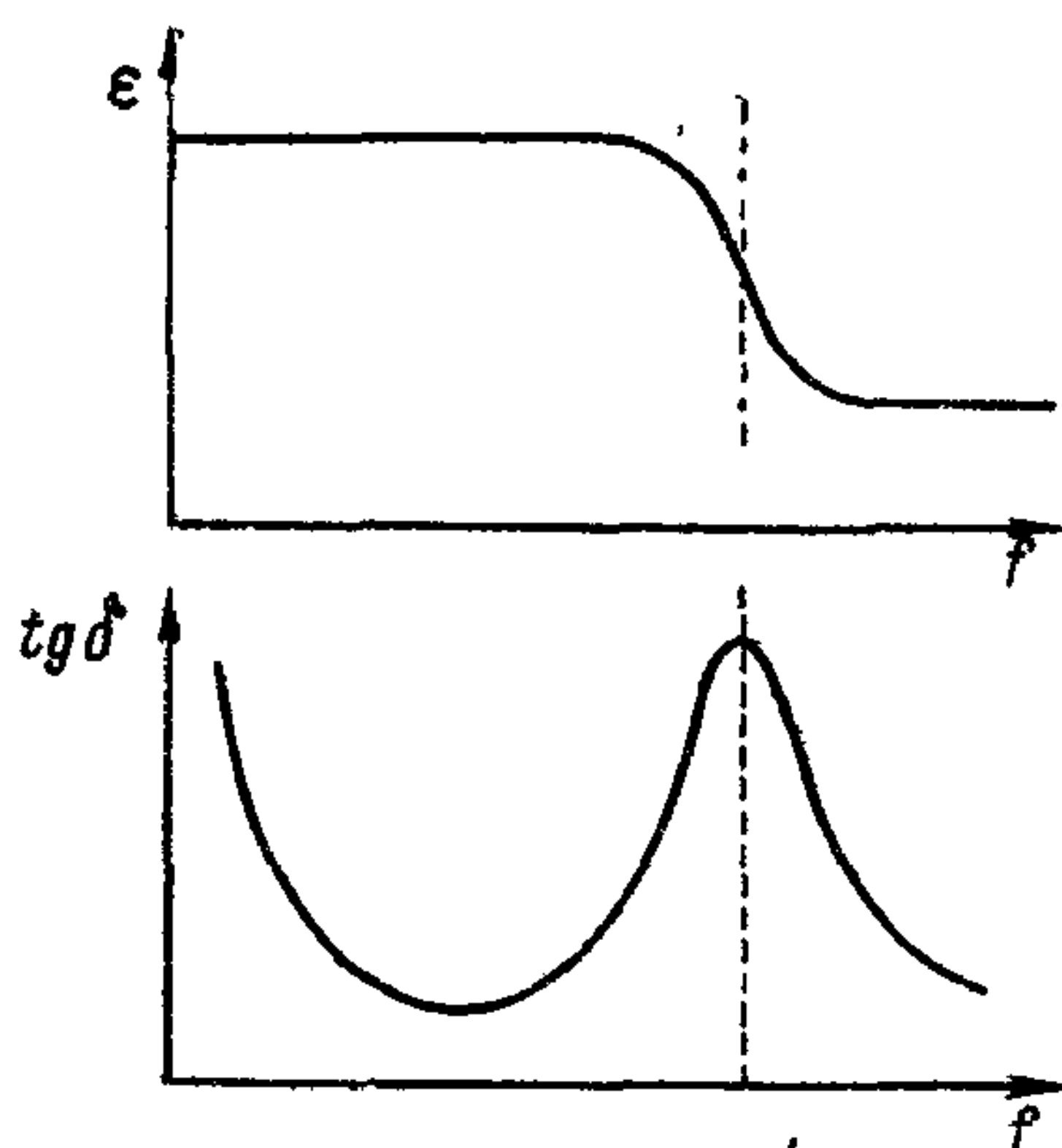


Рис. 157. Общий характер частотной зависимости диэлектрической проницаемости (вверху) и угла потерь (внизу) для полярной жидкости.

Лектроноловые конденсаторы выпускались со следующими номинальными данными:

Рабочее напряжение	2—9 кв (частота 0,54 Мгц)
Номинальная емкость	от 2900 пф до 0,34 мкф
Реактивная мощность	350—1500 квар
Рабочий ток	88—230 а

При наличии водяного охлаждения удельная реактивная мощность составляла 50—100 вар/см³, т. е. была такого же порядка, как у газонаполненных конденсаторов при естественном воздушном охлаждении. Допуск по емкости был равен ±5%, tg δ — не более 5 · 10⁻⁴ (фактически порядка 3 · 10⁻⁴, причем 2/3 потерь обусловлены металлом и 1/3 — жидким диэлектриком).

Конденсаторы такого типа рекламировались только одной фирмой и, по-видимому, даже в США не нашли себе широкого распространения. В наших условиях в контурах электротермических устройств применяются более простые и дешёвые керамические конденсаторы. Конденсаторы с жидким диэлектриком в настоящее время не являются перспективным типом конденсатора. В современном конденсаторостроении жидкие диэлектрики находят себе основное применение только в виде дополнительного диэлектрика для пропитки и заливки бумажных и пленочных конденсаторов (гл. XII).

КОНДЕНСАТОРЫ С ТВЕРДЫМ НЕОРГАНИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

§ 62. Общая характеристика

При использовании твердого неорганического диэлектрика для изготовления конденсаторов его можно применить в качестве основы конструкции, закрепляя на нем обкладки, что резко упрощает конструкцию. В ряде случаев конденсатор этого типа может представлять собой кусочек диэлектрика, на который обкладки нанесены непосредственной его металлизацией; выводами служат отрезки проволоки, припаянные к обкладкам; внешнее оформление для защиты от влажности часто сводится лишь к покрытию лаком или окунанию в защитный компаунд (окукливание).

Большая нагревостойкость и твердость неорганических диэлектриков обеспечивают неизменность расстояния между обкладками, что способствует получению большой стабильности емкости во времени и помогает решить задачу повышения рабочей температуры конденсатора. Многие неорганические диэлектрики отличаются небольшим значением коэффициента линейного расширения и имеют малый ТКЕ; это позволяет при использовании таких диэлектриков получать конденсаторы с малым значением ТКЕ.

Ряд неорганических диэлектриков имеет малый $\operatorname{tg} \delta$, что позволяет с успехом использовать эти диэлектрики в производстве высокочастотных конденсаторов. Преимуществом неорганических диэлектриков перед органическими является их высокая химическая стабильность; во многих случаях она обеспечивает отсутствие старения при длительном действии электрического поля и повышенной температуры. Однако при высокой температуре и постоянном напряжении старение может иметь место и у некоторых типов конденсаторов с неорганическим диэлектриком (§ 36).

Если в отношении угла потерь неорганические диэлектрики уступают газам, обеспечивая в лучшем случае получение минимального значения порядка 10^{-4} , то по величине ϵ они превосходят не только газообразные, но и жидкие диэлектрики, а также и твердые органические материалы. Большинство твердых неорганических диэлектриков имеют ϵ выше 5, многие имеют ϵ выше 10. Уже давно были разработаны неорганические диэлектрики на основе TiO_2 , имеющие ϵ порядка 80—90. В настоящее время при малом значении угла потерь можно получать значения ϵ до 400. В последние годы разработаны материалы со сверхвысокой ϵ , лежащей в пределах 1000—10 000; следует, однако, иметь в виду, что столь высокие значения ϵ сопровождаются резким ухудшением ее ста-

бильности как во времени, так и при изменении температуры, а также резким возрастанием угла потерь, что невыгодно отличает эти материалы от обычных неорганических диэлектриков и делает возможным их использование только в области низких частот или постоянного напряжения.

Обычным недостатком неорганического материала, с точки зрения конденсаторостроения, является трудность получения малых толщин диэлектрика, что затрудняет изготовление конденсаторов большой емкости даже при высоких и сверхвысоких значениях ϵ [§ 6, формула (2)]. Это определяется хрупкостью обычных неорганических материалов при малой толщине. При использовании керамики или стекла до последнего времени минимальное значение толщины диэлектрика $d_{\text{мин}}$ составляло 0,2—0,3 мм; получение толщин порядка 0,1 мм было связано с большими технологическими трудностями и не обеспечивало достаточной механической прочности; часто приходилось применять, даже при изготовлении конденсаторов низкого напряжения, толщину порядка 1 мм. При высоком рабочем напряжении толщина диэлектрика также оказывалась значительной, так как большинство неорганических диэлектриков имеет относительно небольшую электрическую прочность; величина $E_{\text{пр}}$ в больших толщинах редко превышает 15—20 кВ/мм, а часто оказывается значительно ниже.

Исключением из общего правила являлась слюда, позволяющая получать пластинки толщиной до 0,02—0,03 мм с достаточной механической и высокой электрической прочностью. Однако и этот материал неудобен для получения больших емкостей в связи с небольшой площадью пластинок, а также в связи с высокой стоимостью и дефицитностью слюды.

Новый метод получения пленочного стекла позволяет получать толщины порядка 0,025—0,05 мм, но такое стекло, как и слюду, приходится использовать в виде пластинок относительно небольшой площади, причем стоимость стеклопленочных конденсаторов оказывается еще выше, чем стоимость слюдяных (§ 55).

В связи с этим до последнего времени даже при использовании слюды или керамики со сверхвысокими значениями ϵ не удавалось получать в условиях массового производства конденсаторы с номинальной емкостью, превышающей 0,1—0,2 мкф, даже при малых значениях рабочего напряжения.

Поэтому основной областью применения конденсаторов с неорганическим диэлектриком являлись высокочастотные установки, где не требуются большие емкости, а нужны конденсаторы с малым углом потерь и высокой стабильностью емкости. При небольших значениях емкости конденсаторы такого типа изготавливаются также с высокими значениями рабочего напряжения, порядка десятков киловольт, так как при небольшой емкости большие толщины диэлектрика здесь не приводят к недопустимо большим размерам

конденсатора. Современная высокочастотная техника требует большого количества разнообразных конденсаторов небольшой емкости; поэтому производство конденсаторов с твердым неорганическим диэлектриком, в особенности керамических, достигло высокой степени развития.

В последнее время было уделено много внимания вопросу о с н и ж е н и и н и ж н е г о п р е д е л а т о л щ и н ы неорганических диэлектриков в конденсаторном производстве. Использование новых конструкций и приемов технологии позволяет теперь изготавливать керамические конденсаторы с толщиной диэлектрика порядка 0,05—0,1 мм и получать при использовании сегнетокерамики номинальные емкости до 1—2 мкф при высокой удельной емкости, порядка 1—2 мкф/см³. Это позволило резко расширить область применения конденсаторов с неорганическим диэлектриком при низких частотах, где они теперь часто заменяют бумажные конденсаторы небольших емкостей, хотя и уступают последним по стабильности емкости и другим электрическим характеристикам. В перспективе можно рассчитывать на получение толщин керамики порядка 0,02—0,03 мм, т. е. такого же порядка, как у слюды, что даст дополнительное улучшение их удельных характеристик и расширит верхний предел номинальной емкости. Используя принцип нанесения тонких слоев металла и неорганического диэлектрика на изоляционную подложку, обеспечивающую нужную механическую прочность, удалось получить весьма малые толщины неорганического диэлектрика, порядка 1—2 мкм и даже ниже. Это создало основу для появления нового типа т о н к о п л е н о ч н ы х к о н д е н с а т о р о в с неорганическим диэлектриком, которые начинают применяться в производстве микроминиатюрной радиоаппаратуры при малых рабочих напряжениях порядка 10—50 в и емкостях до нескольких тысяч или даже десятков тысяч пикофард.

Современные конденсаторы с неорганическим диэлектриком можно разбить на следующие основные группы: слюдяные, керамические (высокочастотные и низкочастотные), стеклянные и тонкослойные конденсаторы с неорганическим диэлектриком.

А. СЛЮДЯНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

§ 63. Конденсаторная слюда

Слюда представляет собой природный материал, способный расщепляться на тонкие пластинки с достаточно высокой механической и электрической прочностью и обладающий относительно высокой ϵ , а потому удобный для использования в качестве диэлектрика в конденсаторах.

Слюда относится к группе а л ю м о с и л и к а т о в, т. е. содержит Al_2O_3 и SiO_2 , кроме того, в состав природной слюды входит вода в виде групп —ОН, а также те или иные окислы металлов,

по наличию которых различают сорта слюды. Основное применение в конденсаторостроении нашла слюда м у с к о в и т, содержащая K_2O и обладающая высокими электрическими свойствами (табл. 14). Средний состав мусковита можно выразить формулой $3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot K_2O \cdot H_2O$.

Таблица 14

Свойства некоторых сортов слюды и бентонитовой пленки

Наименование свойства	Мусковит	Флогопит	Фтор-флогопит	Бентонитовая пленка
Диэлектрическая проницаемость	6,5—7	5—6	7,6	4,3—4,9
Температурный коэффициент ϵ , град ⁻¹ , $\times 10^6$	+ (10 ÷ 20)	—	—	+150
Тангенс угла потерь, $\times 10^4$ (1 кц).	1—1,5	10—100	3	25—30
Удельное объемное сопротивление, ом·см	10^{15} — 10^{16}	10^{13} — 10^{13}	10^{17} — 10^{18}	10^{15}
Пробивная напряженность, кв/мм (50 гц, 25 мм)	125—130	120—130	130—140	100—150
Максимальная температура, °С	500	800—1000	800—1000	250
Коэффициент линейного расширения, град ⁻¹ , $\times 10^6$. . .	10—13	8—10	20	—
Удельный вес, г/см ³	2,7—2,8	2,7—2,8	3,5	—

Твердые сорта железо-магнезиальной слюды ф л о г о п и т применяются для изоляции секций от корпуса. В последние годы твердый флогопит нашел себе также применение в качестве основного диэлектрика в конденсаторах для особо высокой рабочей температуры, поскольку нагревостойкость флогопита выше, чем мусковита. Средний состав флогопита: $Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 6MgO \cdot K_2O \times \times 2H_2O + Fe_2O_3$ (в виде примеси).

Имеется также возможность получения слюды искусственным путем при расплавлении специально подобранной шихты и ее кристаллизации при весьма медленном охлаждении. С и н т е т и ч е с к а я слюда известна под названием фтор-флогопита, поскольку в ее составе гидроксильные группы —ОН заменены атомами фтора. Пример состава шихты (в вес. ч.): Al_2O_3 — 0,5; SiO_2 — 3; MgO — 2,5; MgF_2 — 0,5; KF — 1. Нагрев до 1300—1400° С и охлаждение со скоростью порядка 0,5—1° С/ч. Кристаллы синтетической слюды также способны расщепляться, но выход таких кристаллов из общего количества полученной синтетической слюды относительно невелик. По внешнему виду этот материал напоминает слюду мусковит. Синтетическая слюда, как у нас, так и за рубежом (США) стоит значительно дороже природной.

Было также предложено получать тонкие пластинки, напоминающие слюду (но непрозрачные и с меньшей механической прочностью) из б е н т о н и т о в о й г л и н ы (монтмориллонита), имеющей состав $Al_2O_3 \cdot 5SiO_2 (Mg, Ca) O \cdot nH_2O$.

Из водной суспензии этой глины можно было высаживать тонкие пластинки на металлической поверхности, имеющей положительный потенциал, поскольку частички глины в воде заряжены отрицательно. Такие пластинки были известны под названиями: бентофилм, алсифилм, амплифилм и диаплекс. Они находили себе одно время применение в конденсаторостроении США, но теперь, видимо, вышли из употребления.

Основным видом слюды, применяемым в конденсаторном производстве, продолжает оставаться мусковит. Основные месторождения качественного мусковита находятся в СССР (Восточная Сибирь, Карелия, Урал) и в Индии (Бенгалия). Стоимость муско-

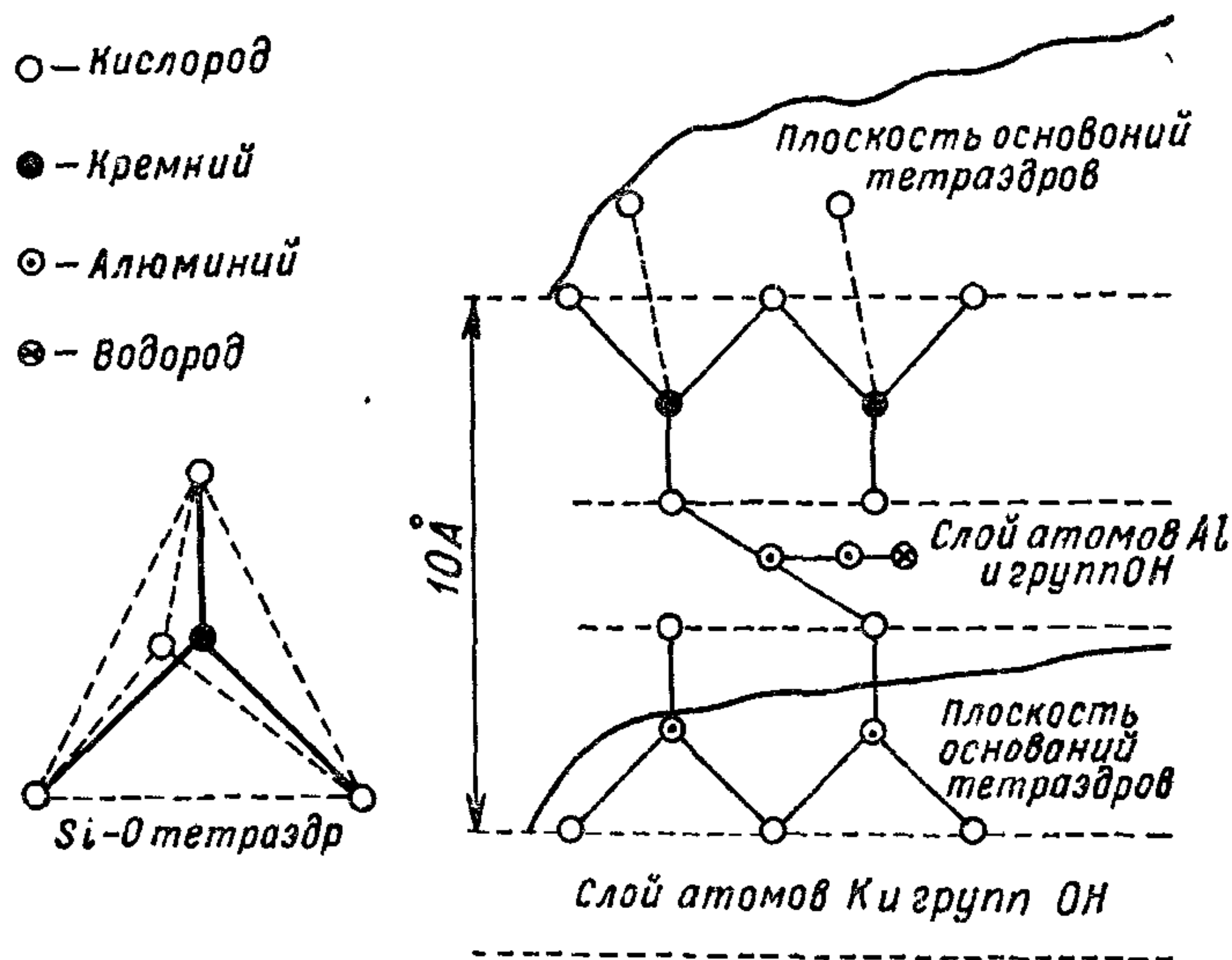


Рис. 158. Схема структуры слюды мусковит.

вита велика ввиду его малого содержания в основной породе (1,5—3%), трудности добычи и малого выхода пластинок, годных для изготовления конденсаторов (0,4% от добытого сырца). Из слюды-сырца после очистки и обрезки добытых кристаллов для конденсаторного производства вырубают при помощи штампа или вырезают гильотинными ножницами прямоугольные пластинки, называемые шаблоном.

Ходовые размеры конденсаторной шаблонки: от $4 \times 9 \div 7 \times 17$ мм до $38 \times 38 \div 50 \times 60$ мм. Толщина пластинок составляет 0,02—0,06 мм. Расщепление до меньших толщин дает большой механический брак. Слюда толщиной 0,1—0,3 мм применяется для изоляции конденсаторных секций от корпуса или для изоляции между секциями.

Легкость расщепления слюды объясняется слоистой структурой этого минерала (рис. 158). В плоскости двойного слоя кремнекислородных тетраэдров между атомами существует весьма прочная

связь; в перпендикулярном направлении между соседними двойными слоями связь резко ослаблена. Толщина двойного слоя, представляющего собой элементарный слой в структуре слюды, составляет около 10 \AA ($0,001 \text{ мкм}$). Между элементарными слоями располагаются легкоподвижные атомы калия и гидроксильные группы, что вызывает увеличенную проводимость слюды в направлении, параллельном плоскостям спайности. Данные о величине электрических свойств, указанные в табл. 14, получены в направлении, перпендикулярном этим плоскостям. При измерении вдоль слоев значения $\rho_{об}$ снижаются до 10^8 — $10^9 \text{ ом} \cdot \text{см}$, а величина $\text{tg } \delta$ при низких частотах может вырасти до 1000 — $2000 \cdot 10^{-4}$.

В тонких пластинках слюда мусковит бесцветна, но толстые пластинки имеют различную окраску. Наименьший $\text{tg } \delta$ имеет розовый, золотистый и коричневый мусковит; у серебристого мусковита $\text{tg } \delta$ в 1,5 раза выше, а у зеленого — в 2,5—3 раза выше, чем указано в табл. 14. Окраска слюды зависит от присутствия небольшого количества окислов Fe, Cr или Ti. Слюда легко смачивается водой, а потому с повышением влажности воздуха ее $\rho_{пов}$ резко падает: от 10^{14} до 10^9 ом . Теплоустойчивость слюды мусковит высока: она выдерживает кратковременный нагрев до 500°C без каких-либо внешних изменений.

При дальнейшем повышении температуры начинается выделение кристаллизационной воды и происходит вспучивание слюды (рис. 159). При длительном воздействии температуры структурные изменения в слюде мусковит можно заметить и при 500°C . После нагрева до 1000°C мусковит приобретает сильную хрупкость, а при 1250 — 1300°C начинает сплавляться в непрозрачное стекло.

Зависимость электрической прочности слюды при испытании под маслом при частоте 50 гц от толщины пластинок показана на рис. 160. Для зеленого Кыштымского мусковита $E_{пр}$ на 10—15% ниже, что, по-видимому, связано с наличием в нем заметного содержания закиси железа FeO, что объясняет зеленую окраску этого сорта слюды и его повышенный $\text{tg } \delta$, о чем упоминалось выше.

При испытании слюды в однородном поле можно устранить зависимость $E_{пр}$ от толщины и получать значения порядка 350 — 400 кВ/мм , а при электродах малой площади — даже до 700 кВ/мм (амплитуда до 1000 кВ/мм); такого же порядка значения могут быть получены в однородном поле и при постоянном напряжении.

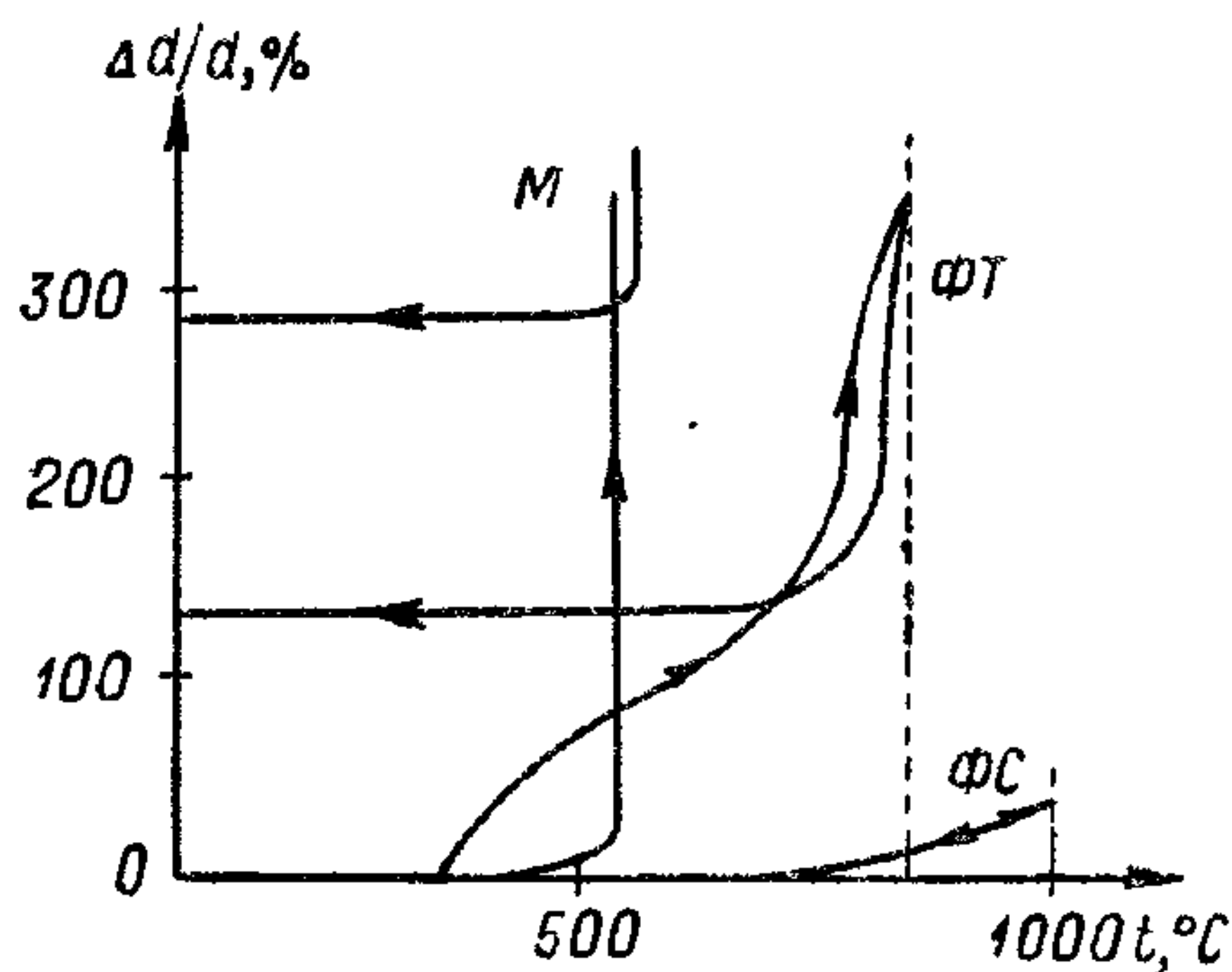


Рис. 159. Вспучивание слюды при нагревании: М — мусковит, ФТ — темный флогопит, ФС — светлый флогопит.

Однако на столь высокие значения нельзя ориентироваться при расчете слюдяных конденсаторов, в которых диэлектрик работает в резко неоднородном поле и при увеличенной площади электродов. Даже данные рис. 160, полученные в условиях неоднородного

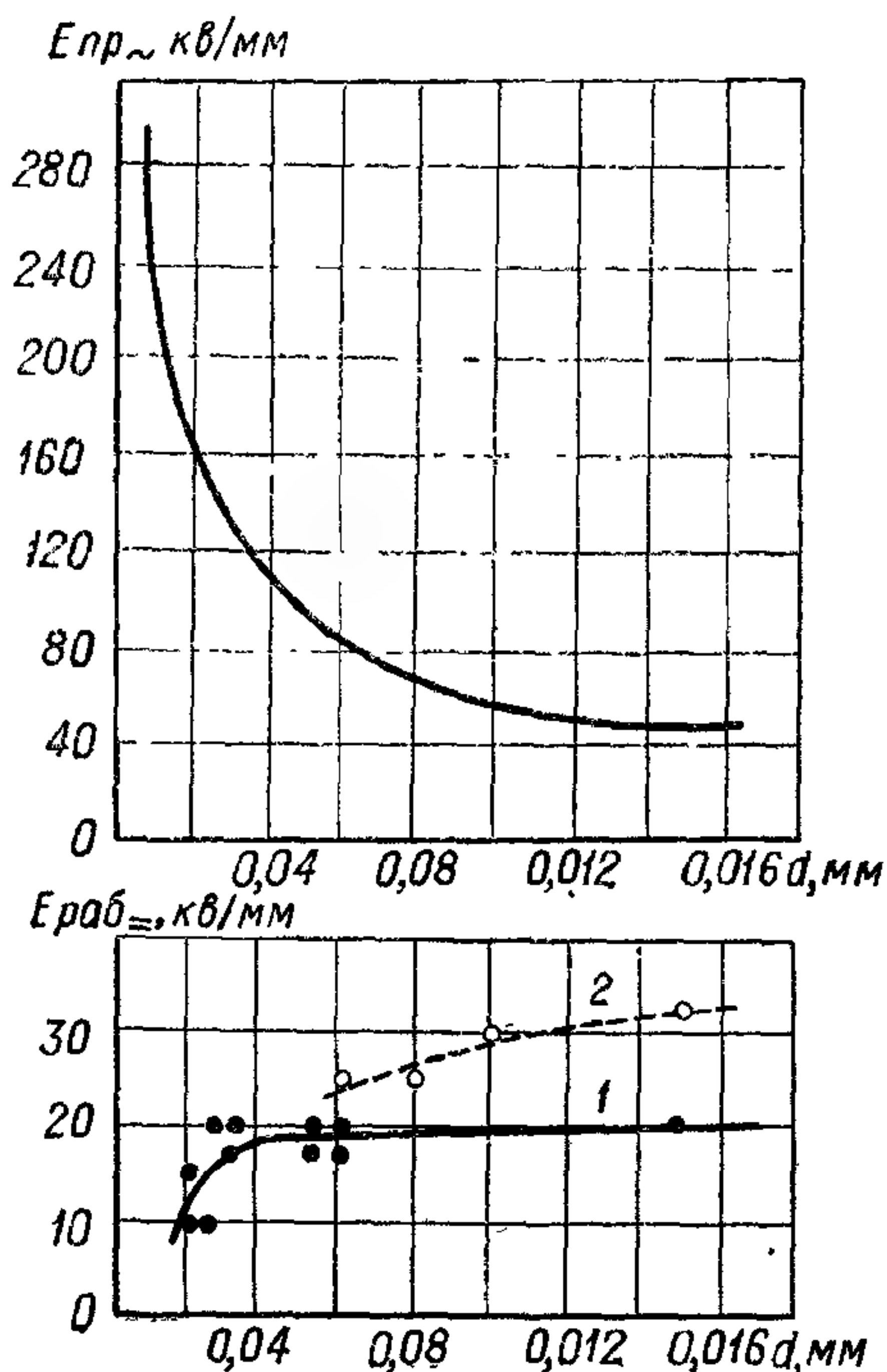


Рис. 160. Электрическая прочность слюды мусковит: *вверху* зависимость кратковременной электрической прочности от толщины пластинок при испытании под маслом при электродах малой площади (50 гц, действующее значение); *внизу* зависимость допускаемой напряженности при постоянном напряжении от толщины диэлектрика в слюдяных конденсаторах.

(1 — однослойный диэлектрик; 2 — двух-
трехслойный диэлектрик).

одной пластинки слюды той же суммарной толщины ($150 \text{ мкм} = 0,15 \text{ мм}$) принимают $E_{раб} = 20 \text{ кВ/мм}$.

В слюдяном конденсаторе электрическое поле направлено перпендикулярно слоям слюды, т. е. обеспечивается оптимальное использование этого диэлектрика. Однако при наличии в слюде посторонних включений, прежде всего воздушных, может появиться местное искажение поля (рис. 161), в результате которого возникает тангенциальная составляющая напряженности E

поля (плоские электроды, под маслом), особенно при малых толщинах, следует рассматривать как завышенные, так как они соответствуют электродам малой площади (менее 5 см^2) и представляют собой средние значения, от которых может быть заметный разброс. При увеличении площади обкладки возрастает вероятность нахождения между обкладками слабых мест (с пониженной $E_{пр}$ как природных, связанных с наличием в слюде вкраплений кварца и других дефектов, так и вызванных механическими повреждениями пластинок при их расщипке (царапины, проколы). В связи с этим при малых толщинах слюды, несмотря на повышение средних значений $E_{пр}$ (рис. 160), значения $E_{раб}$ приходится снижать; при постоянном напряжении обычно допускают: при толщине 0,03—0,06 мм $E_{раб} = 17 \div 26 \text{ кВ/мм}$, а при 0,02—0,025 мм 10—15 кВ/мм. Влияние слабых мест можно уменьшить, применяя между обкладками по нескольку пластинок, что позволяет повышать $E_{раб}$; для диэлектрика $2 \times (0,03 \div 0,05) \text{ мм}$ до 25—30 кВ/мм и для диэлектрика $3 \times 0,05 \text{ мм}$ до 33,3 кВ/мм. Для

направленная по плоскостям спайности и вызывающая поэтому заметное ухудшение электрических свойств, в первую очередь проводимости и $\operatorname{tg} \delta$.

Воздушные включения представляют собой пузырьки воздуха (иногда и других газов), заключенные между слоями слюды. При высоком напряжении они могут вызвать рост $\operatorname{tg} \delta$ за счет развития ионизации. При низких напряжениях и низкой частоте они также приводят к росту $\operatorname{tg} \delta$ за счет искажения поля и появления составляющей E_T . Возникающие при этом добавочные

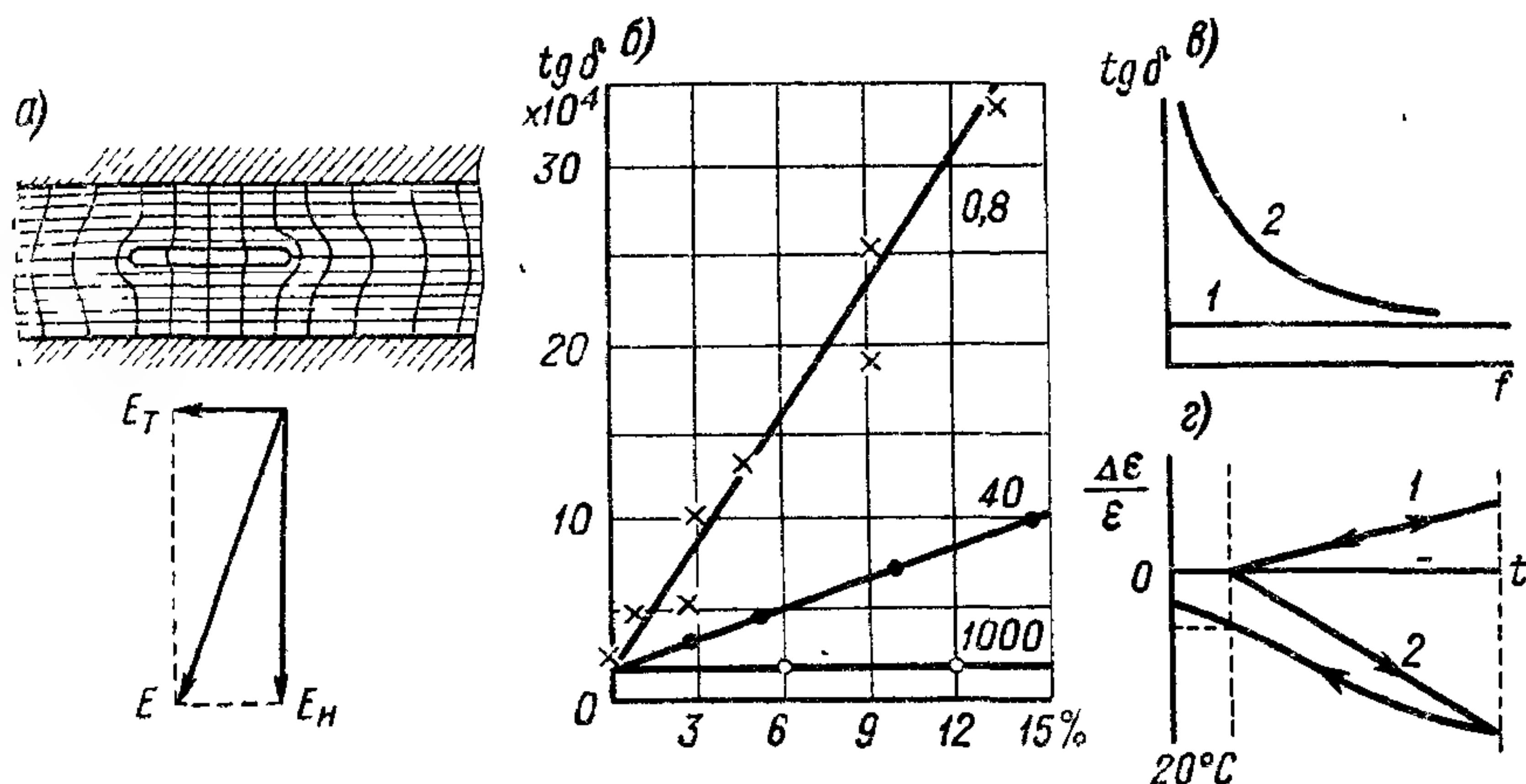


Рис. 161. Влияние воздушных включений на электрические свойства слюды мусковит: а — схема искажения поля, вызванного воздушным включением; б — зависимость угла потерь от площади, занятой воздушными включениями, при трех значениях частоты (в кГц); в — зависимость угла потерь слюды от частоты

1 — чистая слюда, 2 — с воздушными включениями;

г — зависимость изменения диэлектрической проницаемости от температуры при нагревании образца слюды: чистого (1) или содержащего воздух (2).

потери обусловлены проводимостью (на поверхностях раздела слоев слюды), поэтому с ростом частоты $\operatorname{tg} \delta$ уменьшается [см. выше формулу (103)] и при радиочастотах обычно уже имеет то же значение, как и у чистой слюды.

На величине $E_{\text{пр}}$ воздушные включения практически не сказываются, но могут вызывать увеличение ТКЕ и ухудшение стабильности емкости. При наличии воздуха в слюде ТКЕ может изменить свой знак (из положительного стать отрицательным) и увеличить абсолютное значение более чем в 10 раз. Одновременно появляются необратимые изменения емкости слюдяной пластинки после прогрева за счет необратимых изменений размера воздушных включений. Поэтому при изготовлении слюдяных конденсаторов с особо высокой стабильностью желательно применять совершенно чистую слюду или хотя бы слюду с малым содержанием воздушных включений (до 2—3% от площади пластинки). Наличие таких сортов

слюда предусмотрена в ГОСТ 7134—57 на слюду конденсаторную. Следует отметить, что наличие воздуха в слюде может вызвать появление зависимости емкости конденсатора от давления окружающей среды; для конденсаторов негерметизированного типа при изменении давления от 760 до 125 мм рт. ст. наблюдались изменения емкости порядка 0,01—2%.

Пятнистость слюды характеризуется присутствием в слюдяных пластинках пятен различного цвета и разнообразной формы. Эти пятна представляют собой инородные включения, чаще всего полупроводящие окислы железа, располагающиеся по плоскости спайности слюды; реже наблюдаются включения, проросшие через несколько слоев слюды. Обычно пятна сопровождаются воздушными включениями. Отдельные пятна могут повышать $\text{tg } \delta$ слюды до $10—20 \cdot 10^{-4}$, пятна, занимающие 10—15% площади пластинки, иногда увеличивают $\text{tg } \delta$ до $50—60 \cdot 10^{-4}$. Эти цифры относятся к частоте 1 кГц, при радиочастотах даже сильно пятнистая слюда обычно имеет малый $\text{tg } \delta$. Большое разнообразие формы, размеров, цвета и состава пятен не позволяет дать общих рекомендаций об их вредности. Для решения вопроса о пригодности пятнистой слюды для конкретного типа конденсаторов лучше всего изготовить из нее опытные конденсаторы и измерить их $\text{tg } \delta$ при рабочей частоте. Наличие воздушных включений в местах расположения пятен может вредно влиять на ТК_ε и стабильность емкости. На величину $E_{\text{пр}}$ пятнистость обычно не оказывает существенного влияния. При очень сильной пятнистости снижение $E_{\text{пр}}$ не превышает 10—15%.

Поверхностные загрязнения слюды в процессе ее обработки (грязь, отпечатки пальцев) приводят к повышению $\text{tg } \delta$ конденсаторов. Поэтому в производстве надо соблюдать чистоту и сводить к минимуму касание слюды руками. Часто применяют промывку слюды перед сборкой спиртом или другим легколетучим растворителем. Перед вакуумным серебрением иногда применяют обработку поверхности слюды разрядом.

Согласно ГОСТ 7134—57 слюда поставляется с допуском по толщине 5 мкм, при этом в партии допускается до 4% пластинок выше 65 мкм и до 1% с толщиной менее 20 мкм. Такая сортировка слюды обычно приводит к необходимости пересортировки по толщине («калибровки») получаемой слюды с более узким допуском (обычно $\pm 2 \div 2,5$ мкм).

Большое количество пластинок слюды, потребляемое современным производством слюдяных конденсаторов, сделало весьма актуальной задачу автоматизации процесса калибровки по толщине как у нас, так и за рубежом. Для этой цели применяются различные принципы: электрические, оптические и механические. Промышленный тип раскалибровочного автомата в СССР был создан на принципе использования зависимости величины прогиба пластинки слюды, закрепленной одним концом и нагруженной на другом конце определенным грузом, от толщины пластинки.

§ 64. Стабильность емкости слюдяных конденсаторов

Диэлектрическая проницаемость слюды мало зависит от температуры и не изменяется со временем. Однако стабильность емкости слюдяного конденсатора в сильной степени зависит от его конструкции и технологии и при невысоком уровне производства может оказаться неудовлетворительной.

Слюдяные конденсаторы изготавливаются как с обкладками из фольги, так и с металлизированными обкладками из серебра (§ 22). При использовании обкладок из фольги для повышения стабильности необходимо применять достаточно сильное сжатие конден-

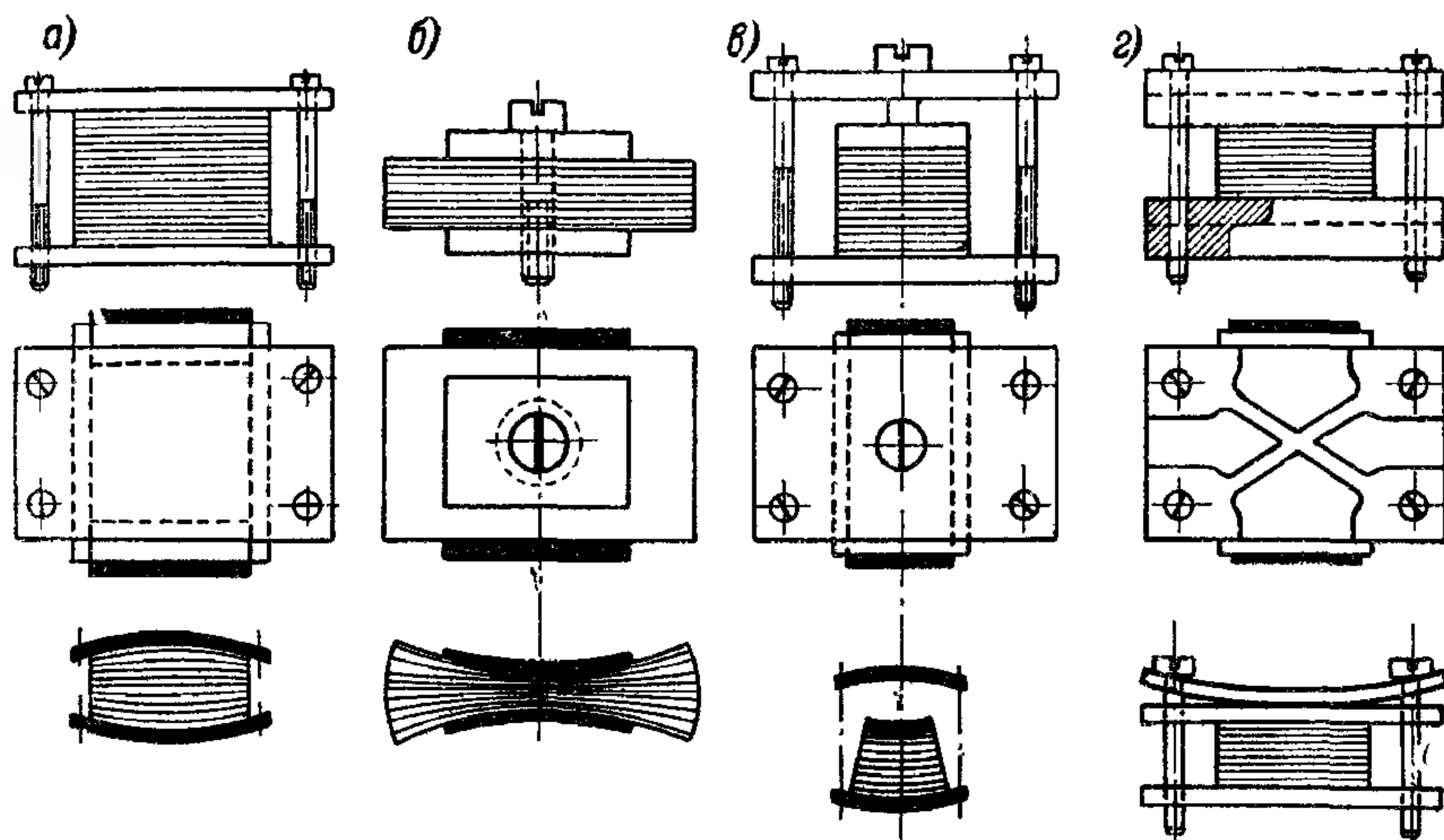


Рис. 162. Типы обжимок для слюдяных конденсаторов с обкладками из фольги: а — обжимка с четырьмя винтами; б — обжимка с одним винтом; в — обжимка с пятью винтами; г — обжимка с ребрами жесткости и четырьмя винтами (вверху) и с вогнутой пружиной (внизу).

саторной секции в специальных обжимках (§ 21). Несколько вариантов таких обжимок, использованных в производстве слюдяных конденсаторов, показано на рис. 162. Простейший вариант (а) не обеспечивает достаточно сильного сжатия, так как при сильной затяжке винтов пластины обжимки деформируются и удельное давление в середине секции, т. е. на активной площади обкладок, снижается. Обжимка с одним винтом (б) неудобна тем, что требует сверления отверстий в слюде; винт нельзя брать с большим диаметром, так как это ухудшает использование слюды; поэтому и здесь нельзя получить большого удельного давления. Вариант в позволяет применять большие удельные давления, а потому, несмотря на свою сложность и увеличенные размеры, находил себе применение, когда серебрение слюды еще не было освоено и приходилось добиваться высокой стабильности при использовании фольговых обкладок. Некоторое упрощение этой конструкции можно получить, используя нажимную выгнутую пружинящую

пластину (з). Модификацию варианта в можно встретить в мощных слюдяных конденсаторах, изготовляемых в корпусах; четыре боковых винта и крайние пластины обжимки заменены боковыми стенками корпуса (или двумя стенками, дном и крышкой); остаются средняя нажимная пластина и центральный винт, пропущенный через одну из стенок или через крышку (см. ниже, рис. 169).

Увеличение удельного давления при использовании варианта а можно получить, применяя массивные пластины с ребрами жесткости (рис. 162, з).

При сборке слюдяного конденсатора в металлических обжимках необходимо изолировать конденсаторную секцию от обжимных

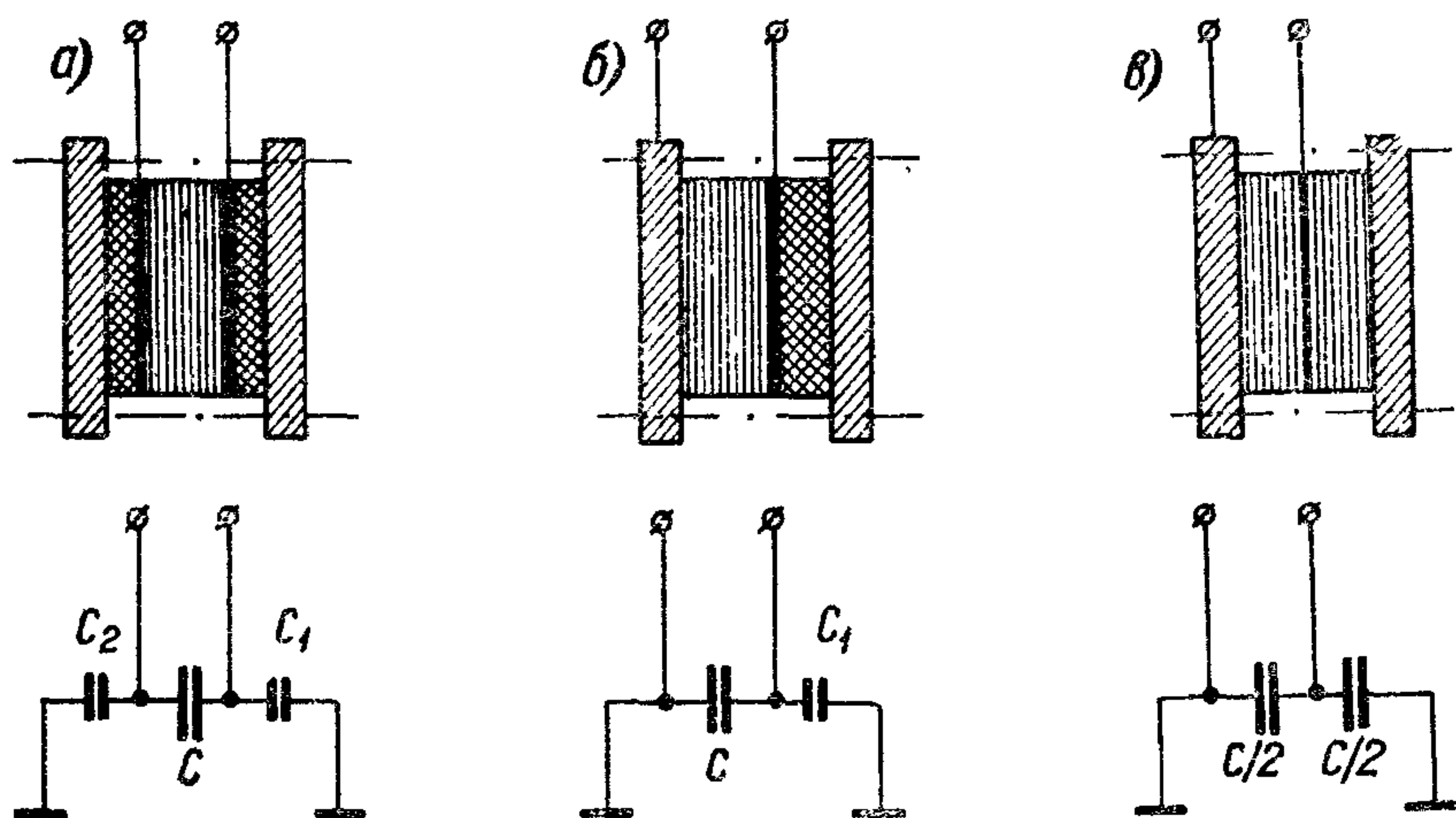


Рис. 163. Паразитные емкости по отношению к обжимкам в слюдяном конденсаторе: а — две паразитные емкости (два изолированных вывода); б — одна паразитная емкость (один вывод — на обжимку); в — паразитные емкости устранены.

пластин. Для изоляции обычно применяют слюду худшего качества, а иногда и какой-либо иной диэлектрик, уступающей слюде по электрическим свойствам. В этом случае появляются паразитные емкости C_1 и C_2 (рис. 163), которые могут ухудшить стабильность емкости конденсатора и повысить его $\operatorname{tg} \delta$ [формула (117)]. Соединив один из выводов конденсатора с обжимкой, мы избавляемся лишь от одной из паразитных емкостей, например C_2 , а влияние оставшейся даже усилится. Для устранения обеих емкостей C_1 и C_2 надо разбить конденсатор на две параллельно соединенные секции равной емкости; присоединив по одному выводу каждой секции к обжимке и сделав один общий изолированный вывод, можно освободиться от изоляции по отношению к обжимкам.

При увеличении степени сжатия секций фольга плотнее прилегает к слюде, зазоры уменьшаются и емкость растет (рис. 164). Зависимость $C = f(P)$ может приводить к тому, что при колебаниях температуры за счет разности коэффициентов расширения

стягивающих винтов и секции конденсатора удельное давление может изменяться, а с ним будет меняться и емкость. Изменение размеров стягивающих винтов со временем вследствие текучести металла или постепенного исчезновения внутренних напряжений может вызывать изменение емкости с течением времени даже при постоянстве температуры.

Чтобы ослабить эти явления, надо работать на пологой части кривой $C = f(P)$, где колебания давления меньше изменяют емкость, т. е. применять достаточно большие давления (50—150 кг/см² при оловянно-свинцовой фольге и 100—150 кг/см² при медной фольге). Для конденсаторов большой мощности сильное сжатие нужно также для устранения вибрации обкладок, создающей добавочные потери.

Используя формулу (34), можно найти ТКЕ для сильносжатого и непропитанного слюдяного конденсатора с обкладками из оловянно-свинцовой фольги, приняв для нее $\alpha_m = 27,5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; значения α_d и α_e для слюды мусковит можно взять из табл. 14:

$$\alpha_c = [(10 \div 20) + 2 \cdot 2,75 - 10] \times 10^{-6} = (55 \div 65) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}.$$

Расширение стягивающих винтов при нагревании больше расширения конденсаторной секции; поэтому можно ожидать снижения удельного давления и уменьшения емкости, снижающего полученное выше значение ТКЕ; действительно, для конденсаторов такого типа величина ТКЕ была порядка $+(40 \div 60) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; при условии проведения специальной термической обработки (150—160° С, несколько часов) изменение емкости таких конденсаторов за год не превышало 0,05—0,10%.

При слабом сжатии, как например в опрессованных конденсаторах (с обкладками из фольги), величина ТКЕ и стабильность емкости резко ухудшены в сравнении с указанными здесь цифрами; поэтому для таких конденсаторов эти характеристики даже не нормируются (конденсаторы группы А по ГОСТ 11 155—65).

Применение серебряной слюды, исключаящее зазор между слюдой и обкладками, позволяет обеспечить высокую стабильность емкости слюдяного конденсатора. Используя формулу (35) для этого случая, находим ТКЕ для серебряного непропитанного конденсатора:

$$\alpha_c = [(10 \div 20) + 10] \cdot 10^{-6} = +(20 \div 30) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}.$$

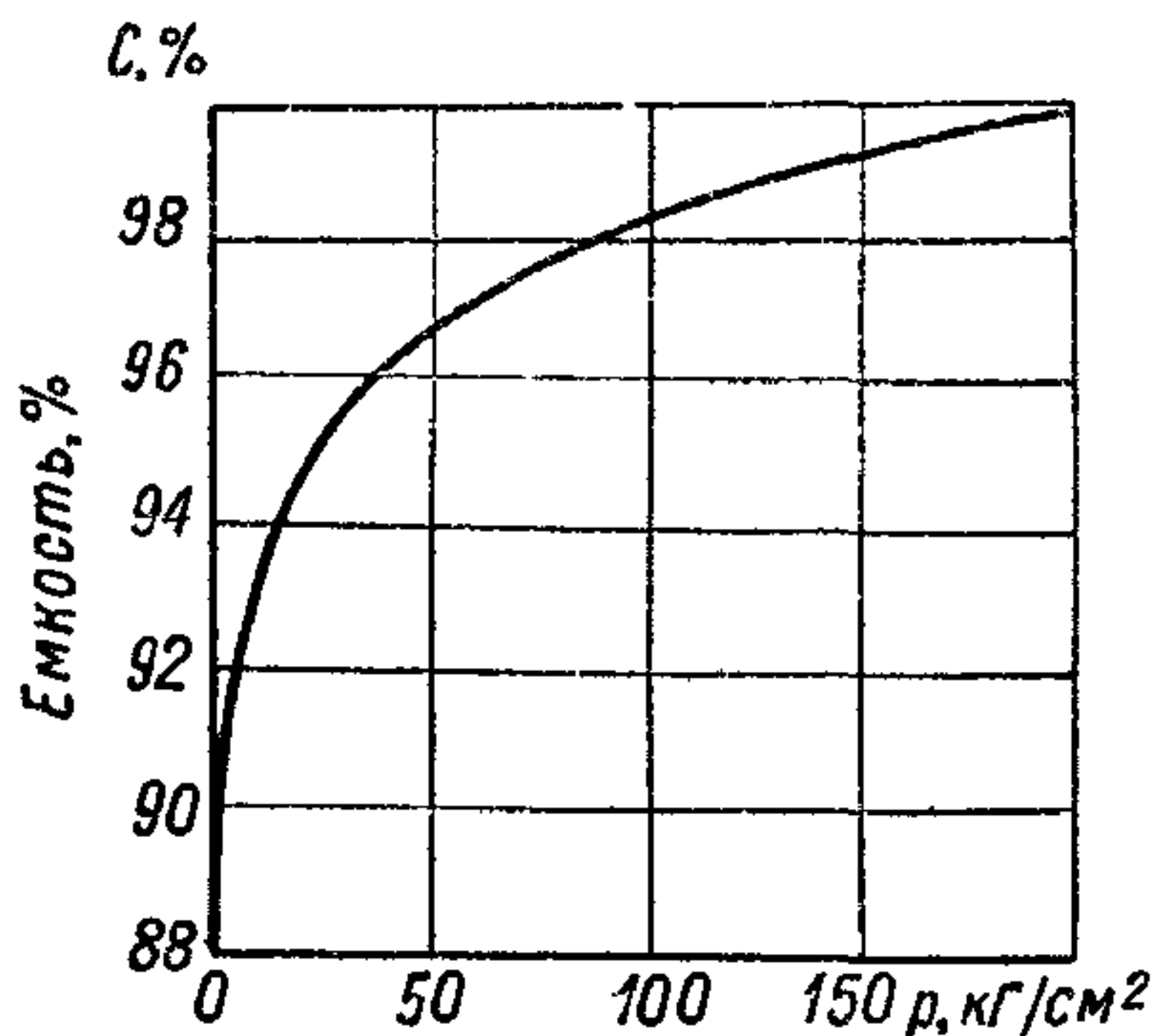


Рис. 164. Зависимость емкости слюдяного конденсатора с обкладками из оловянно-свинцовой фольги от удельного давления на активной площади.

Такие значения действительно можно получать для подобных конденсаторов, причем изменение емкости с температурой носит линейный характер (рис. 165).

Слюда легко смачивается водой; поэтому если поместить высушенный слюдяной конденсатор даже в условия комнатной влажности, то можно заметить возрастание емкости и, особенно, угла потерь. В связи с этим в производстве слюдяных серебряных конденсаторов собранные секции после сушки подвергают пропитке церезином, чтобы обеспечить их влагозащиту на период времени до их опрессовки или герметизации в защитном корпусе.

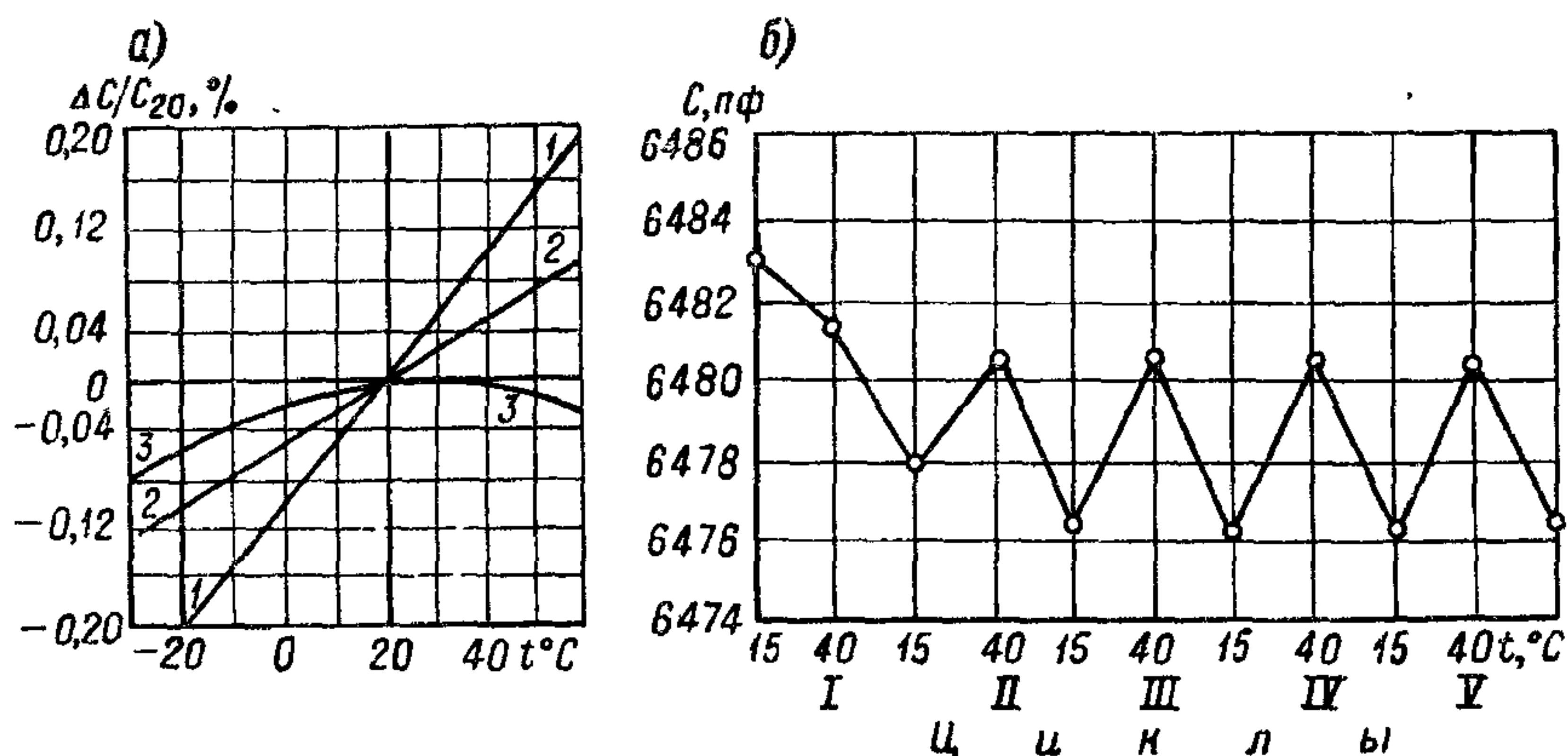


Рис. 165. Температурная зависимость емкости слюдяных конденсаторов: а — зависимость емкости от температуры:

1 — непропитанный конденсатор с обкладками из фольги высокого качества ($\text{ТКЕ} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$); 2 — непропитанный серебряный конденсатор ($\text{ТКЕ} = 25 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$); 3 — пропитанный церезином серебряный конденсатор;

б — изменение емкости пропитанного серебряного конденсатора при циклических сменах температуры.

Изменение емкости слюдяных серебряных конденсаторов после пропитки невелико и не превышает нескольких процентов. Оно связано с наличием в секции паразитных емкостей $C_{\text{п}}$, обусловленных незначительными колебаниями размеров закраин, полученных при серебрении, и небольшими смещениями краев пластинок при сборке. При пропитке воздух замещается церезином, имеющим в порядка 2, что дает увеличение $C_{\text{п}}$, а следовательно, и общей емкости конденсатора. Для церезина $\text{ТКЕ} = -1000 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, т. е. очень велик в сравнении с ТКЕ для слюды и имеет обратный знак. Поэтому даже при малых значениях емкостей $C_{\text{п}}$ они влияют на характер зависимости емкости серебряного конденсатора от температуры, вызывая отклонение от линейности (рис. 165).

Для того чтобы емкость циклично изменялась при неоднократных прогревах, пропитанные конденсаторы надо подвергать температурной тренировке (два-три прогрева при $t_{\text{макс}}$ с последующим охлаждением до $t_{\text{комн}}$). Стабильность емкости при повторяющихся температурных циклах удобно характеризовать зубчатой кривой,

построенной по чередующимся установившимся значениям емкости в нагретом и охлажденном состоянии (рис. 165). Такие кривые удобны для оценки качества и других типов конденсаторов стабильной емкости. У тщательно изготовленных слюдяных серебряных конденсаторов стабильность емкости весьма высока, изменения емкости при длительном хранении обычно не превышают 0,01—0,02 %.

В массовом производстве, когда нельзя гарантировать отсутствие в слюде воздушных включений, для наилучших слюдяных серебряных конденсаторов (группа *г*) гарантируется ТКЕ не более $\pm 50 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; изменение емкости таких конденсаторов во времени обычно не более 0,1 %.

Зависимость емкости слюдяных конденсаторов от частоты в области низких частот определяется междуслойной поляризацией; переход от 1 к 10 *гц* может дать снижение емкости порядка 0,5—1 %, а от 10 *гц* к 10 *кГц* — порядка 0,1—0,2 %. В области высоких частот может наблюдаться увеличение емкости за счет влияния индуктивности конденсатора (см. рис. 30). Для конденсаторов малой емкости $L \approx (4 \div 25) \cdot 10^{-9} \text{ гн}$, и резонансная частота составляет 50—100 *МГц*, для конденсаторов большой емкости $L \approx (50 \div 100) \cdot 10^{-9} \text{ гн}$, и резонансная частота резко снижается; при $C_{\text{ном}} = 1 \text{ мкф}$ и $L = 100 \cdot 10^{-9} \text{ гн}$, $f_{\text{раз}} = 0,5 \text{ МГц}$; если допустимое изменение емкости ограничить величиной 0,01 %, то предельная частота составит всего 0,5 *кГц*.

К недостаткам серебряных конденсаторов относится явление «мерцания» (§ 23), вызывающее при высоких частотах скачкообразное изменение емкости и возрастание потерь. Это явление усиливается при возрастании напряжения; поэтому в слюдяных конденсаторах, используемых при повышенных напряжениях высокой частоты, приходится использовать обкладки из фольги, соглашаясь на ухудшение стабильности. Можно устранить «мерцание» и сохранить стабильность, если применить комбинированную обкладку, т. е. поверх обкладки, полученной серебрением, класть вторую обкладку из фольги с такими размерами, чтобы она перекрывала края серебряного слоя и шунтировала «островки» серебра, служащие причиной «мерцания».

Тщательно изготовленные слюдяные конденсаторы по стабильности, емкости и величине ТКЕ не уступают первоклассным конденсаторам с газообразным диэлектриком, если не считать небольшой зависимости емкости от частоты в области низких частот, которая отсутствует, когда диэлектриком в конденсаторе служит газ. Кроме того, для слюдяных конденсаторов резко увеличено значение коэффициента абсорбции (§ 14).

§ 65. Слюдяные конденсаторы малой мощности

Среди различных типов слюдяных конденсаторов наибольшее распространение в электронной аппаратуре находят слюдяные конденсаторы малой мощности, до 0,1—0,15 *квар*. Конденсаторы

Этого типа отличаются малым углом потерь, высокой стабильностью емкости и относительно небольшими габаритами при емкостях до 0,01—0,1 мкф. Рост потребности в этих конденсаторах при дефицитности конденсаторной слюды заставляет уделять внимание вопросу их замены другими типами конденсаторов, близкими к ним по свойствам, но изготавливаемыми из доступных и более дешевых материалов. При небольших емкостях порядка 100—1000 пф эта задача решается применением наравне со слюдяными керамических высокочастотных и стеклоэмалевых конденсаторов, а при емкостях порядка тысяч и десятков тысяч пикофард — полистирольных конденсаторов. Указанные здесь типы конденсаторов-заменителей пока еще не столько вытесняют слюдяные конденсаторы, сколько дополняют их, пополняя дефицит в слюдяных конденсаторах и расширяя номенклатуру высокочастотных конденсаторов малой мощности как в сторону очень малых емкостей (керамические конденсаторы), так и в сторону больших емкостей (полистирольные конденсаторы).

Сводка основных данных о различных типах слюдяных конденсаторов небольшой мощности приведена в табл. 15.

Таблица 15

Слюдяные конденсаторы малой реактивной мощности

Тип	C _{ном}		U _{ном} , в	P _R , вар	Q _{макс} , мкк	(q _{уд}) _{макс} , мкк.см ³	t _{макс} , °C	Конструкция
	пф	мкф						
КСО	10	0,05	250—7000	5—150	25	0,7	70	Уплот-
СГМ	100	0,01	250—1000	5—20	6,8	1,9	80	ненная
КСГ	470	0,1	500—1000	50—100	50	1,6	70	Герме-
ССГ	150	0,2	350	50—100	70	1,45	70	тизиро-
СГМЗ	50	0,01	750	—	7,5	—	70	ванная
СГО	1000	0,03	250—500	—	150	0,51	70	То же
СГОС	—	0,4	250	—	100	0,9	35	» »
КЗ1У-3Е	51	0,0068	250—500	—	3,4	0,95	100	» »
КСОТ	51	0,01	250—1000	5—50	10	1,1	155	Уплот-
КЗ1П-1	470	0,01	630	30—50	6,3	0,2	500	ненная
								То же
								Герме-
								тизиро-
								ванная

Примечание. Эта таблица (как и аналогичные сводные таблицы 20, 21, 24 и другие, ниже) не претендует на полноту перечисления существующих типов конденсаторов рассматриваемой группы; приведенные здесь данные служат лишь примером конкретных значений основных характеристик этой группы конденсаторов.

Наиболее массовым является тип КСО — слюдяные конденсаторы, опрессованные пластмас

с о й; они изготавливаются с широкой номенклатурой емкостей и номинального напряжения (рис. 166, а и рис. 119, д). В маркировке конденсаторов типа КСО указывается рабочее напряжение посто-

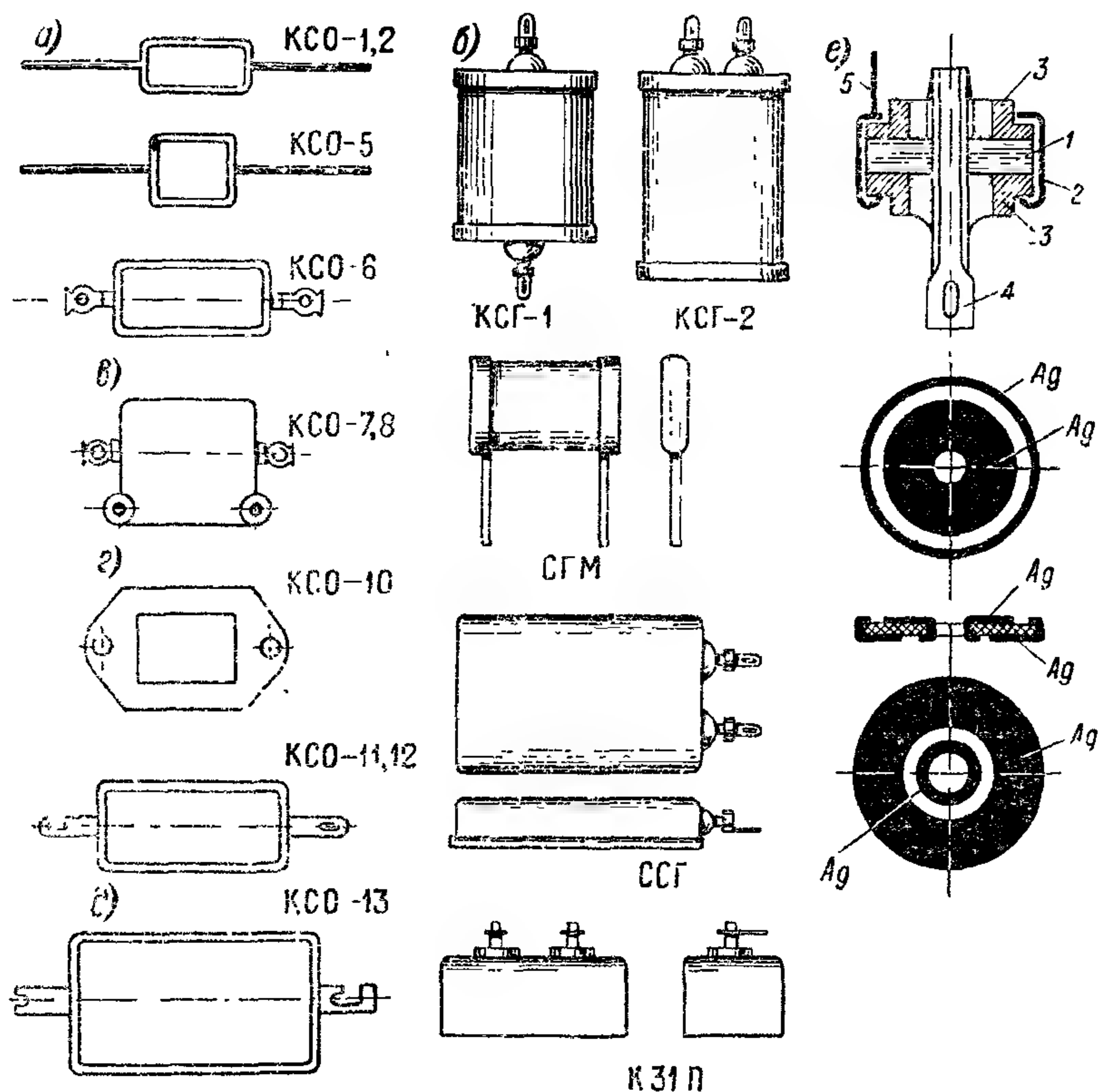


Рис. 166. Слюдяные конденсаторы малой мощности: а — опрессованные конденсаторы: КСО-1,2: $(13-18) \times (7-11) \times (4,6-5,5)$ мм; КСО-5: $20 \times 20 \times (6,5-9)$ мм; КСО-7,8: $32 \times 28,6 \times (8,6-11)$ мм; КСО-10: $44,5 \times 34 \times 19$ мм; КСО-11,12: $(41-46) \times (20-27) \times (10-12)$ мм; КСО-13: $64 \times 40 \times 14$ мм; б — конденсаторы, герметизированные в металлических корпусах: КСГ-1: $26 \times 24 \times 14$ мм; КСГ-2: $45 \times 31 \times 23$ мм; в — конденсаторы, герметизированные в керамических корпусах: СГМ-1: $13 \times 9,5 \times 6$ мм; СГМ-2: $13 \times 10 \times 7$ мм; СГМ-3: $18 \times 13,5 \times 7,5$ мм; СГМ-4: $18 \times 22 \times 9$ мм; г — конденсаторы для телефонных фильтров ССГ: д — особо нагревостойкие конденсаторы К31П-1: $(30-40) \times (20-35) \times (18-23)$ мм; е — пуговичный проходной конденсатор.

1 — секция конденсатора; 2 — латунный корпус (обойма); 3 — стеклянные прокладки; 4 — высокопотенциальный вывод (проходной стержень); 5 — вывод от корпуса (внизу — серебряная слюдяная шайба).

янного тока; $U_{ис} = 2$, $U_{раб}$ в течение 10 сек. При использовании слюдяных конденсаторов при переменном напряжении, особенно при высоких частотах, допускаемое рабочее напряжение приходится снижать в сравнении с номинальным напряжением постоянного тока, учитывая опасность развития ионизации и нагрева

конденсатора потерями в диэлектрике и в металлических частях. Для устранения опасности ионизации амплитуда переменного напряжения (в процентах от номинального напряжения постоянного тока) не должна превышать следующих значений:

Номинальное напряжение, в (пост. ток)	U' , допускаемая амплитуда переменного напряжения (в %) при частоте		
	до 500 гц	500 гц — 10 кгц	свыше 10 кгц
250	100	60	20
500	50	30	10
1000—3000	30	20	5
5000—7000	15	10	3

Для устранения опасного перегрева, вызванного потерями в диэлектрике, переменное напряжение должно быть таково, чтобы реактивная мощность конденсатора не превышала установленного для него номинального значения; исходя из формулы (78), получаем:

$$U'' = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{P_R}{\omega C_{\text{пф}}}} = 565 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{P_R}{f C_{\text{пф}}}}, \quad (255)$$

где U'' — амплитудное значение напряжения в в, P_R — реактивная мощность в вар, C — номинальная емкость в пф, f — частота в гц.

Величина реактивной мощности определяет нагрев конденсатора при неизменном $\text{tg } \delta$. При высоких частотах $\text{tg } \delta$ начинает расти за счет потерь в металле:

$$P_{\text{АМ}} = I^2 r_{\text{м}}, \quad (256)$$

где $r_{\text{м}}$ — сопротивление, эквивалентное потерям в металле. С учетом поверхностного эффекта можно написать:

$$r_{\text{м}} \approx k_1 \sqrt{f}.$$

Подставляя это выражение в формулу (256) и находя по ней величину тока, соответствующую заданному допустимому значению $A_{\text{АМ}}$, получим:

$$I = \sqrt{\frac{P_{\text{АМ}}}{k_1 \sqrt{f}}} = \frac{k}{\sqrt[4]{f}}. \quad (257)$$

По этой формуле находится допускаемое значение тока при работе слюдяного конденсатора в высокочастотных цепях: в зависимости от размеров конденсатора величина $k = 2 \div 8$ (при f — в Мгц). Умножая ток на значение $\sqrt{2\omega C}$, находим величину допускаемого амплитудного значения переменного напряжения U''' , определяемую потерями в металле. Из трех значений

напряжения U' , U'' и U''' выбирается наименьшее, которое и определяет допустимый режим работы слюдяного конденсатора при высокой частоте. Оно может иметь величину порядка нескольких десятков вольт при $U_{\text{ном}}$ постоянного тока порядка нескольких киловольт.

При работе конденсатора в цепи пульсирующего напряжения должно соблюдаться правило:

$$U_{\text{п}} + U_{\sim} \leq U_{\text{ном}},$$

т. е. сумма постоянной составляющей и амплитуды переменной составляющей не должна превосходить номинального напряжения.

Конденсаторы КСО изготавливаются с точностью емкости $\pm 2, 5, 10$ и 20% ; конденсаторы повышенной точности отбираются при

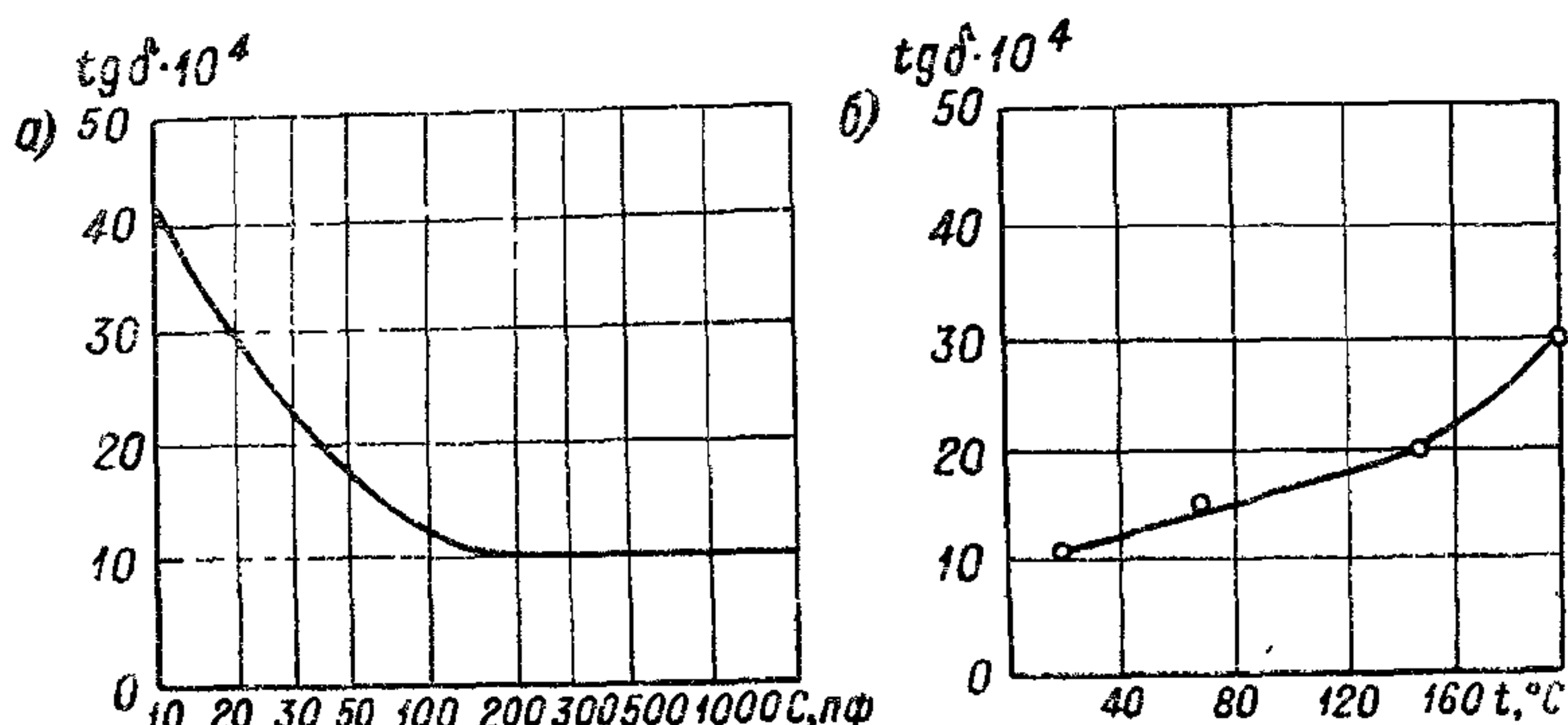


Рис. 167. Допускаемые значения угла потерь слюдяных опрес-сованных конденсаторов при частоте 1 Мгц: а — в зависимости от номинальной емкости при температуре 20° С; б — в зависимости от температуры при номинальной емкости не менее 200 пф.

разбраковке стандартных конденсаторов по величине емкости. По величине ТКЕ конденсаторы КСО делятся на 4 группы: А — ТКЕ не нормируется; Б — $\text{ТКЕ} = \pm 200 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; В — $\text{ТКЕ} = \pm 100 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ и Г — $\text{ТКЕ} = \pm 50 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Указанные значения ТКЕ гарантируются при емкости 100 пф и выше.

Зависимость допускаемого значения $\text{tg } \delta$ при частоте 1 Мгц и 20° С от номинальной емкости показана на рис. 167; при емкостях меньше 200 пф норма на $\text{tg } \delta$ увеличивается, так как начинает сказываться угол потерь в пластмассе [формула (117)]. Влияние частоты на угол потерь слюдяных конденсаторов показано на рис. 59, выше. Сопротивление изоляции для конденсаторов КСО при 20° С и нормальной влажности гарантируется не ниже 7500 Мом.

Длительная работа конденсаторов типа КСО гарантируется при влажности до 80%. После 48 ч выдержки при влажности 98% величина $\text{tg } \delta$ может увеличиться на 50%, а сопротивление изоляции снизиться до 1000—2500 Мом (в зависимости от емкости). Пределы рабочей температуры для конденсаторов КСО: от -60 до $+70^\circ \text{ С}$.

Для использования при высокой влажности применяют герметизированные типы слюдяных конденсаторов: КСГ — в металлическом корпусе и СГМ (малой емкости) в керамическом корпусе с металлическими торцевыми колпачками (рис. 166, б и в; рис. 121, б и д). Электрические характеристики их подобны конденсаторам КСО, но пределы номинального напряжения несколько сужены. Как и в случае КСО, для этих конденсаторов нижний предел допуска по емкости составляет $\pm 2\%$. Для применения в телефонных высокочастотных фильтрах изготавливают конденсаторы ССГ (рис. 166, г) и СГМЗ, близкие по конструкции к конденсаторам КСГ и СГМ, но выпускаемые с нестандартными значениями емкости и с повышенной точностью (до $\pm 0,3\%$ при емкостях выше 3500 пф).

Для применения в электроизмерительной аппаратуре выпускают конденсаторы СГО и СГО-С, подобные конденсаторам КСГ, но с точностью подгонки до $\pm 0,25 \div 0,5\%$ и с увеличенной $C_{\text{ном}}$ — до 0,3—0,4 мкф.

Повышение рабочих температур радиоаппаратуры привело к необходимости разработки слюдяных конденсаторов с увеличенным верхним пределом температуры: КЗ1У-ЗЕ — до $+100^\circ\text{C}$ и КСОТ — до $+155^\circ\text{C}$. При таких значениях температуры использование слюды мусковит вполне возможно. Зависимость допускаемого значения угла потерь таких конденсаторов от температуры показана на рис. 167. При снижении рабочего напряжения на 30% применение конденсаторов типа КСОТ возможно даже при 200°C . Однако, когда была поставлена задача создать слюдяной конденсатор на рабочую температуру до 500°C , от применения слюды мусковит пришлось отказаться, так как длительный нагрев при такой температуре уже приводит к ее разрушению. В связи с этим в конденсаторах типа КЗ1П-1 (рис. 166, д) в качестве диэлектрика использован твердый светлый сорт слюды флогопит, обладающий высокой нагревостойкостью (рис. 159). Для конденсаторов этого типа при 20°C гарантируется сопротивление изоляции 5000 Мом и $\text{tg } \delta < 500 \cdot 10^{-4}$ при 1 кГц и $< 70 \cdot 10^{-4}$ при 1 МГц, при температуре 500°C соответственно 2 Мом и $\text{tg } \delta < 700 \cdot 10^{-4}$ и $100 \cdot 10^{-4}$; допускаемое изменение емкости при $+500^\circ\text{C}$ — до $+10\%$ и при -60°C — до -8% . Эти конденсаторы имеют лишь ограниченное применение.

Опрессованные слюдяные серебряные конденсаторы выпускаются также многими зарубежными фирмами. По нормам МЭК они разделяются на три группы по ТКЕ:

Пределы ТКЕ, град ⁻¹ , $\times 10^6$	Необратимое изменение емкости после нагрева
$-100 \div +100$	$\pm 0,003\text{ C}$
$-20 \div +100$	$\pm (0,001\text{ C} + 0,1\text{ пф})$
$-20 \div +50$	$\pm (0,0005\text{ C} + 0,1\text{ пф})$

Здесь C — номинальная емкость в $пф$.

Верхний предел рабочей температуры для слюдяных конденсаторов этого типа доходит до $125-160^{\circ}C$. В последнее время наряду с опрессованными конденсаторами за рубежом начинают широко применять **о к у к л е н н ы е** к о н д е н с а т о р ы (облицованные влагозащитным компаундом, чаще всего на основе эпоксидной смолы рис. 119, а). Поскольку в производстве таких конденсаторов устранено большое давление, которое приходится применять при опрессовке, то возможность повреждения слюды в процессе изготовления конденсаторов резко снижается и повышается их надежность. По данным фирмы Эль-Менко (США) для окукленных слюдяных конденсаторов удалось получить интенсивность отказов менее $3 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$. Разработка окукленного слюдяного серебряного конденсатора успешно выполнена в СССР.

Некоторые зарубежные фирмы изготавливают **п у г о в и ч н ы е** с л ю д я н ы е к о н д е н с а т о р ы проходного типа (рис. 166, е), собранные из серебряных слюдяных шайб с центральным отверстием. Высокопотенциальный вывод проходит по оси секции через отверстие, соединяясь с одной из обкладок каждой шайбы. Секция помещена в серебряный латунный корпус, служащий одновременно вторым выводом; это осуществляется путем создания контакта между корпусом и сдвинутой к наружному краю слюдяной шайбой второй обкладкой по высоте всей секции. Герметизация производится с помощью двух стеклянных проходных изоляторов, припаянных к корпусу (обойме). Емкость одной шайбы — порядка 50 пф , емкость конденсаторов — до 1200 пф . Они отличаются малой индуктивностью, и при емкостях порядка 500 пф и ниже их резонансная частота выше 1000 Мгц . $TKE = 0 \div +50 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, стабильность емкости во времени — $0,03\%$, пределы рабочей температуры $-55 \div +125^{\circ}C$.

Новым вариантом слюдяного конденсатора является **н а м о - г а н н ы й** к о н д е н с а т о р с д и э л е к т р и к о м и з с л ю д я н о й б у м а г и. Такая бумага изготавливается на специальной машине, напоминающей бумагоделательную, из измельченных отходов слюды и может быть получена с толщиной до $25-30 \text{ мм}$. Конденсаторы из слюдяной бумаги изготавливаются фирмой «Бендикс» (США) с интервалом рабочих температур $-50 \div +200^{\circ}C$, номинальной емкостью $0,0033 \div 6 \text{ мкф}$ и номинальным напряжением $200-3000 \text{ в}$; конструкция — герметизированная. Зависимость емкости, угла потерь и постоянной времени от температуры показана на рис. 168. Максимальный заряд: 6000 мкк и максимальный удельный заряд: $18,5 \text{ мкк/см}^3$. При напряжении 200 в наибольшая удельная емкость равна $0,017 \text{ мкф/см}^3$ (для слюдяных конденсаторов $(c_{уд})_{\text{макс}} \approx 0,003 \div 0,004 \text{ мкф/см}^3$). Фирма сообщала, что в разработке находится серия конденсаторов этого типа с верхним пределом температуры $+415^{\circ}C$; постоянная времени при такой температуре — порядка $1 \text{ ом} \cdot \text{ф}$. При рабочей температуре $200^{\circ}C$ для пропитки конденсаторов используется

отверждающийся полиэфирный компаунд¹; корпуса конденсаторов изготовлены из никелированной латуни (цилиндрические) или из никелированной холоднокатаной стали (прямоугольные); изоляторы — стеклянные; в качестве обкладок использована алюминиевая фольга. Для пропитанной слюдяной бумаги $\epsilon \approx 4 \div 5$. Конденсаторы этого типа представляют интерес для применения в тех случаях, когда требуется относительно большая емкость при значительном напряжении, порядка сотен вольт или нескольких киловольт, а нагревостойкость бумажных или пленочных конденсаторов оказывается недостаточной.

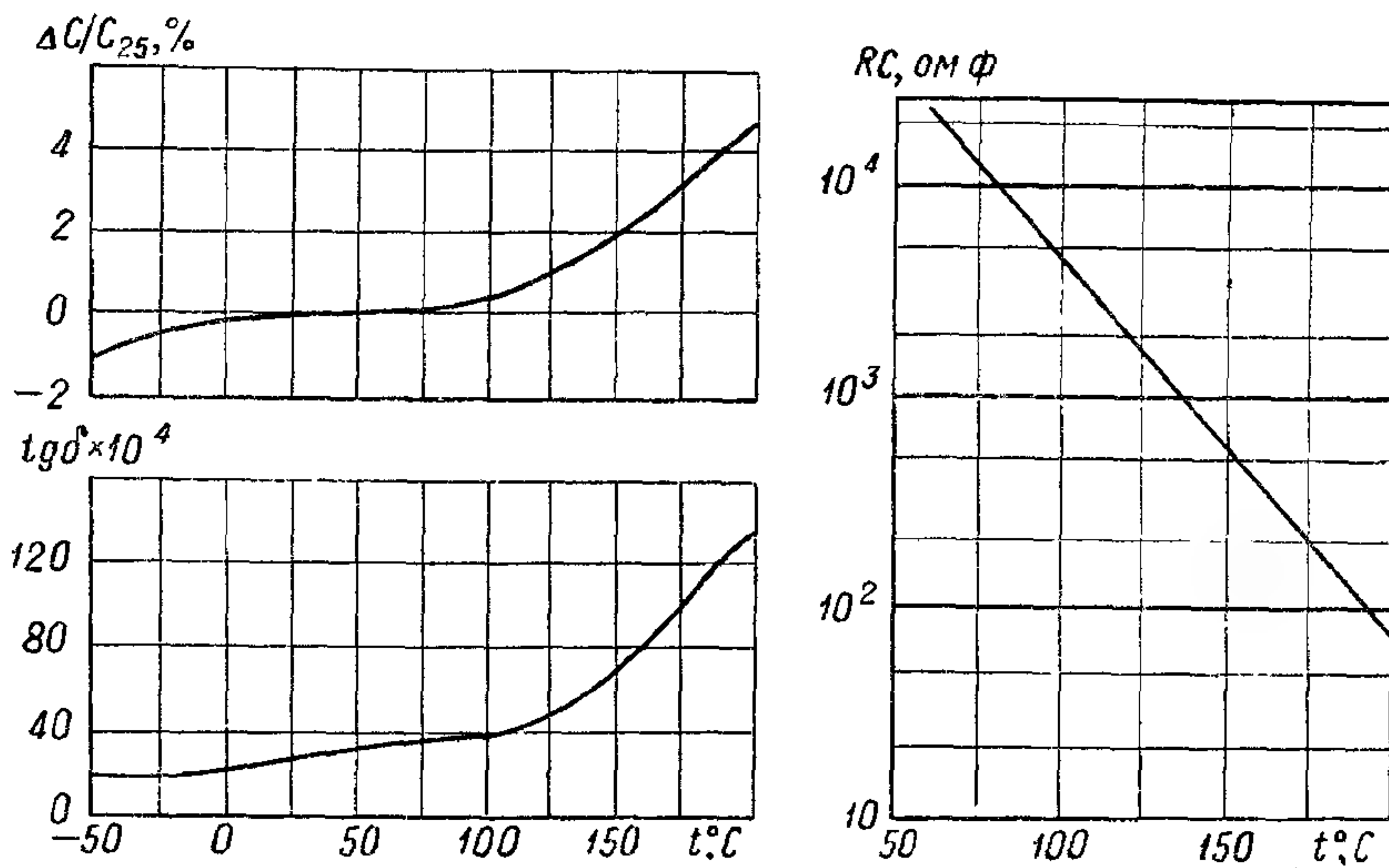


Рис. 168. Температурная зависимость электрических свойств для конденсаторов из слюдяной бумаги.

Процесс изготовления слюдяных конденсаторов обычных типов начинается с раскалибровки слюды, которая теперь проводится на автоматах. Далее слюдяные пластины, уложенные в кассеты, направляются на операцию серебрения, которая обычно проводится на вакуумной установке (§ 22). Для этой цели пластинки слюды из кассет на специальном полуавтомате («укладчике») перекадываются в рамки, которые обеспечивают создание изоляционных закраин в процессе серебрения. В вакуумной установке рамки закрепляются в держателях, позволяющих осуществлять поворот рамок в камере для того, чтобы можно было покрыть серебром обе стороны пластинки, не извлекая ее из камеры. После серебрения слюдяные пластинки подвергают термической обработке в течение 30 мин при 200 $^{\circ}\text{C}$ для

¹ По патенту США 317—258 № 3 273 032 от 13.09.1966 г. для пропитки конденсаторов, рассчитанных на 415 $^{\circ}\text{C}$, предлагается кипящий раствор 200 г H_3BO_3 на 500 мл воды с добавкой 15 г MgO ; после пропитки запекание при 88, 315 и 415 $^{\circ}\text{C}$ по 10—15 ч.

снятия внутренних напряжений между поверхностью слюды и металлическим слоем.

Серебряные пластинки слюды, уложенные в кассеты, поступают в автомат проверки электрической прочности. Иногда применяется также сортировка пластинок по их емкости. Сборка секций как из серебряной слюды (рис. 38), так и с обкладками из фольги производится на полуавтоматах (или автоматах), снабженных присосами для захвата слюдяных пластинок (и отрезков фольги), их переноса и укладки в сборочное гнездо. При этом полуавтомат может быть настроен на укладку числа пластинок, требуемого для получения нужной емкости. Собранные секции обжимаются в обжимках на специальном полуавтомате.

Перед осуществлением окончательной влагозащиты секций путем опрессовки, окукливания или герметизации обычно проводится их пропитка церезином после вакуумной сушки. Если рабочая температура конденсатора превышает 100°C , то от пропитки церезином приходится отказываться. В этом случае после сушки секций необходимо быстро провести операции ее влагозащиты, пока она еще находится в нагретом состоянии.

Испытания готовых конденсаторов проводятся на автоматических контрольных устройствах, после чего выполняют маркировку конденсаторов на маркировочных автоматах.

§ 66. Слюдяные конденсаторы большой мощности

Ранее мощные слюдяные конденсаторы являлись основным типом конденсаторов для контуров высокой частоты в радиопередающей аппаратуре большой мощности, а также для контуров электрогермических высокочастотных установок с ламповыми генераторами. Теперь из колебательных контуров радиостанций слюдяной конденсатор вытесняется газонаполненным или вакуумным, а из электротермических устройств — керамическим конденсатором. В связи с этим выпуск слюдяных конденсаторов данного типа сокращается.

В мощном колебательном контуре конденсатор работает в тяжелых условиях, подвергаясь воздействию высокого напряжения высокой частоты. Чтобы в этих условиях конденсатор не имел опасного перегрева, необходимо снижать его потери, стараясь полностью исключить потери на ионизацию, а также на вибрацию обкладок и максимально снизить потери в диэлектрике и в металлических частях. Для устранения потерь, связанных с явлением «мерцания» (§ 23), приходится отказываться от металлизации и применять обкладки из фольги; это позволяет также снизить потери в обкладках за счет увеличения их сечения. При обкладках из фольги для получения нужной стабильности емкости необходимо сильно сжимать конденсаторную секцию; это помогает также устранить вибрацию обкладок. Для уменьшения потерь в диэлектрике требуется применять слюду с минимально возможным

содержанием дефектов и проводить сушку конденсаторных секций перед их герметизацией в корпусе.

Толщину слюды для контурных слюдяных конденсаторов обычно берут порядка 0,05—0,1 мм. При заданной толщине слюды и заданной рабочей частоте можно найти среднее значение напряжения начал ионизации («короны») у краев обкладки, используя эмпирическую формулу

$$U_{\text{ион}} = A - B \lg f, \quad (258)$$

где $A \approx 10B$ при работе на воздухе и $A \approx 6,7B$ при работе в масле, f — в гц. Значение B выбирается в соответствии с выбранной толщиной слюды:

Толщина слюды, мм	Значение B на воздухе	Значение B в масле
0,02	64	400
0,05	78	520
0,10	102	725
0,20	140	1000

Так, например, для работы на воздухе при толщине 0,05 мм и 10^5 гц $U_{\text{ион}} = 10 \cdot 78 - 78 \cdot 5 = 780 - 390 = 390$ в. Это ориентировочное среднее значение, по отношению к которому допускаемое напряжение на одну секцию U_c следует брать с запасом, порядка 25—30%. Число последовательно включаемых секций n находят делением $U_{\text{раб}}$ конденсатора на U_c . Емкость секции будет в n раз больше емкости конденсатора $C_{\text{ном}}$.

Конденсатор, сконструированный из расчета на устранение ионизации, необходимо проверить на нагрев в рабочем режиме как путем теплового расчета (глава VIII), так и непосредственным испытанием под нагрузкой.

Конструкция слюдяного контурного конденсатора типа КВ показана на рис. 169. Пакет секций 1 помещен в керамический корпус 2 и залит в нем битумом. Корпус закрыт с обоих торцов массивными крышками 3 и 4, литыми из силумина; они закреплены на корпусе цементной заливкой 5. В верхней крышке имеется отверстие, в которое входит пластина 6, упирающаяся краями в крышку (после вкладывания ее поворачивают на 90°); в пластину 6 завернут винт 7, с помощью которого можно сжимать пакет секций, нажимая на пластину 8. Разрядник 9 служит для защиты конденсатора от перенапряжений.

Конденсаторы этого типа рассчитаны на работу при температурах от -50 до $+30^\circ \text{C}$ (при хранении и транспортировке до $+70^\circ \text{C}$). Номинальные данные: $C_{\text{ном}}$ от 470 нф до 0,3 мкф, $U_{\text{ис}} = 3 \div 60$ кв, реактивная мощность от 8—10 до 60—80 квар. В маркировке указывается допускаемая сила тока при трех зна-

чениях частоты, обеспечивающая максимальную температуру конденсатора не выше 70°C (перегрев 40°C при $t_0 = 30^{\circ}\text{C}$). Оптимальные значения удельной мощности, до $80\text{--}100 \text{ вар/см}^3$, лежат в диапазоне частот $0,1\text{--}1 \text{ Мгц}$ (см. рис. 142). Удельные характеристики таких конденсаторов могут быть улучшены при переходе от твердой заливки (когда $U_{\text{ион}}$ имеет те же значения, как на воздухе) к заливке жидким диэлектриком. В рассмотренном выше примере величина $U_{\text{ион}}$ будет равна:

$$U_{\text{ион}} = 6,7 \cdot 520 - 520 \cdot 5 = \\ = 3480 - 2600 = 880 \text{ в,}$$

т. е. увеличивается в 2,25 раза, что позволяет соответственно уменьшить число секций конденсатора и снизить его объем или увеличить его мощность. При этом, однако, придется принять меры для улучшения охлаждения; известны зарубежные конструкции слюдяных конденсаторов, залитых маслом, с мощностью $350\text{--}500 \text{ квар}$ в литых ребристых корпусах и мощностью 1000 квар — с водяным охлаждением.

Новый вариант мощного слюдяного конденсатора, разработанный в США, не имеет корпуса и покрыт с поверхности теплостойким и теплопроводным слоем эпоксидного компаунда; размеры таких конденсаторов уменьшены на 30% по сравнению с обычной конструкцией, вес снижен на 30—40%, верхний предел рабочей температуры повышен от $70\text{--}80$ до 125°C .

В мощной радиоаппаратуре, кроме слюдяных контурных конденсаторов, применялись также слюдяные анодноразделительные и блокировочные конденсаторы, работающие при относительно высоких напряжениях постоянного тока и небольших нагрузках током высокой частоты. От диэлектрика таких конденсаторов требуется высокая электрическая прочность и достаточно высокая ϵ , требования к стабильности емкости и к величине $\text{tg } \delta$ резко снижены в сравнении с контурными конденсаторами. Поэтому

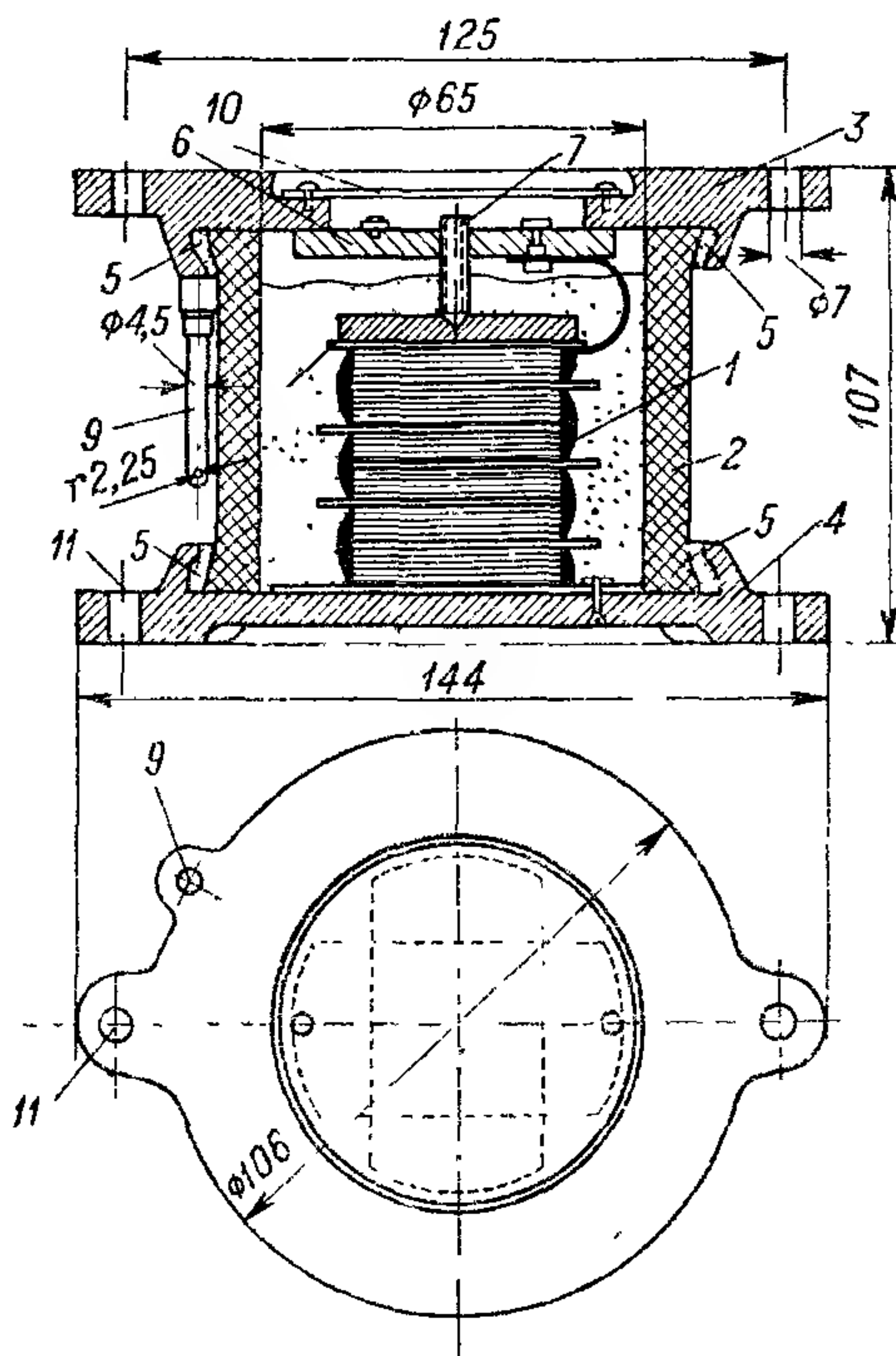


Рис. 169. Контурный конденсатор типа КВ, $0,03 \text{ мкф}$, 30 а , 100 кгц :

1 — пакет секций; 2 — керамический корпус; 3 — верхняя крышка; 4 — нижняя крышка; 5 — цементная заливка; 6 — упорная пластина; 7 — нажимной винт; 8 — обжимная пластина; 9 — разрядник; 10 — маркировочная табличка; 11 — отверстия для крепления.

подобные конденсаторы заменяются сейчас керамическими высоковольтными конденсаторами, а при больших значениях емкости также и намотанными конденсаторами с диэлектриком из синтетических пленок.

§ 67. Слюдяные образцовые конденсаторы и магазины емкости

Опыт, накопленный при разработках отечественных слюдяных радиоконденсаторов, позволил создать отечественную конструкцию слюдяных образцов емкости, дополняющих серию воздушных образцовых конденсаторов (§ 57) и расширяющих пределы емкости образцовых конденсаторов первого класса от 4000 пф до 0,4 мкф (при параллельном соединении — до 1 мкф). Эти конденсаторы, как показали исследования ВНИИМ, по стабильности емкости во времени оказались значительно лучше зарубежных воздушных образцов большой емкости (0,1—0,2 мкф), в которых под действием большого собственного веса происходили заметные деформации, вызывающие за первые годы изменения емкости порядка десятых процента. Кроме образцов первого класса, применяемых для наиболее ответственных измерений, были разработаны также более дешевые образцы второго класса для использования в качестве вторичных образцов емкости в заводских лабораториях. Образцы первого класса были оформлены в цилиндрических корпусах, подобных корпусам воздушных образцов емкости (рис. 144), и рассчитаны на установку на таких же контактных тарелках (рис. 145), допускающая параллельное присоединение к воздушным образцам емкости. Образцы второго класса оформлены в прямоугольных литых корпусах (рис. 170). В корпусе 110 × 58 × 45 мм выпускаются конденсаторы емкостью до 0,1 мкф, для больших емкостей применяют корпус 130 × 78 × 55 мм.

Сравнение свойств образцовых слюдяных конденсаторов первого и второго классов дается ниже:

Наименование характеристики	Образцы первого класса (фактические данные)	Образцы второго класса (норма)
Номинальная емкость, мкф	0,01 ÷ 0,4	0,001 ÷ 0,4
Точность подгонки, %	± (0,05—0,1)	± 0,25%
ТКЕ, град ⁻¹ , × 10 ⁶	+ (15 ÷ 30)	± 50
Стабильность емкости за год, %	± (0,01 ÷ 0,02)	± (0,05 ÷ 0,1)
tg δ при 20° С и частоте 1 кГц	1—3 · 10 ⁻⁴	Не более 5 · 10 ⁻⁴
Постоянная времени, ом · ф	2000—3000	Не менее 100
Изменение емкости при переходе от частоты 50 гц к 10 кГц	--	Не более 0,35%

В образцовых конденсаторах второго класса использованы конденсаторы типа КСГ или СГО, причем для подгонки емкости

применимо параллельное подсоединение конденсаторов КСО малой емкости. В образцовых конденсаторах первого класса применимы специально разработанные конденсаторы с комбинированной обкладкой (§ 64) и с усиленными обжимками типа показанного на рис. 162, г. Для термокомпенсации изменений емкости использовано параллельное присоединение керамических конденсаторов малой емкости с отрицательным ТКЕ (слюдяные конденсаторы имеют положительный ТКЕ). Индуктивность образцовых конденсаторов порядка $60\text{--}70 \cdot 10^{-9}$ гн. Рабочее напряжение образцовых конденсаторов не превышает нескольких сотен вольт.

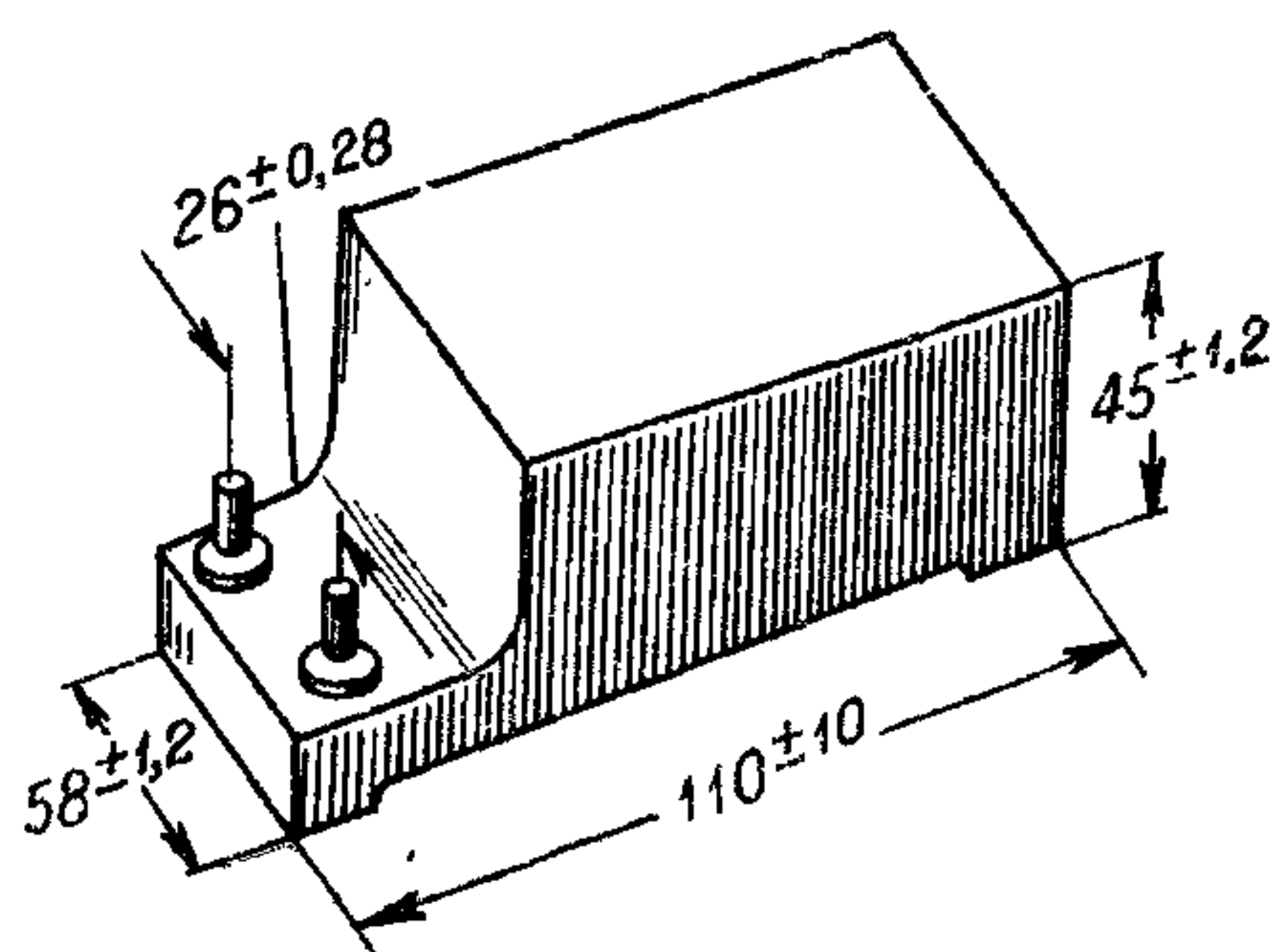


Рис. 170. Слюдяной образцовый конденсатор второго класса.

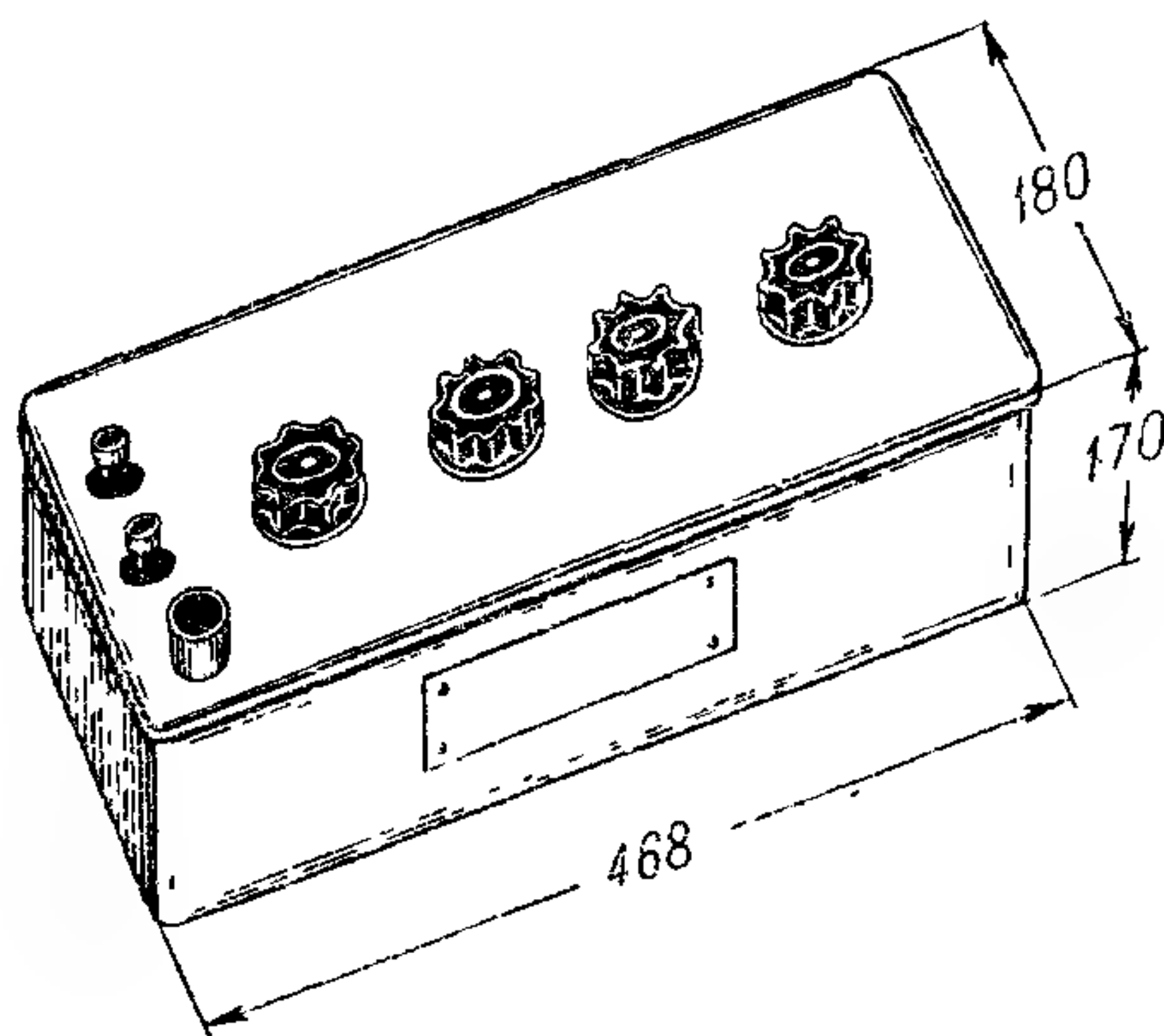


Рис. 171. Слюдяной магазин емкости типа Р513, суммарная емкость 1,111 мкф.

Для образцов второго класса установлено: 500 в постоянного тока, 150 в — при частоте 50—100 гц, 80 в — при 100—1000 гц и 50 в — при 1000—10 000 гц. Пределы температуры: $+10 \div +30^\circ \text{C}$, относительная влажность — до 80%.

В электроизмерительной технике находят широкое применение магазины емкости (рис. 171), особенно при мостовых измерениях. Магазин емкости представляет собой набор слюдяных конденсаторов, позволяющий изменять емкость ступенями по 0,001 мкф, обычно в пределах до 1 мкф, редко до 2—5 мкф. Иногда такие магазины снабжают вмонтированным в тот же корпус воздушным переменным прямоемкостным конденсатором с максимальной емкостью 1000 пф.

Магазины емкости с максимальным значением емкости до 0,1 мкф некоторые фирмы изготавливают из керамических конденсаторов, а с емкостью до 10—20 мкф (иногда до 100 мкф) — из полистирольных конденсаторов. По температурной стабильности емкости такие магазины уступают хорошим слюдяным.

В современных слюдяных магазинах емкости обычно используют конденсаторы из серебряной слюды с повышенной точностью подгонки емкости. В СССР такими конденсаторами являются

типы СГО и СГО-С (табл. 14). Они позволяют изготавливать магазины емкости с основной погрешностью, не превышающей значение

$$\Delta C = \pm \left(0,5 + \frac{K}{C [\text{мкф}]} \right) \%,$$

где $K = 0,0015 \div 0,0022$ в зависимости от типа магазина. При верхнем пределе емкости погрешность составляет $\pm 0,5\%$.

Важным элементом конструкции магазинов емкости является переключающее устройство. Применявшиеся ранее штепсельные

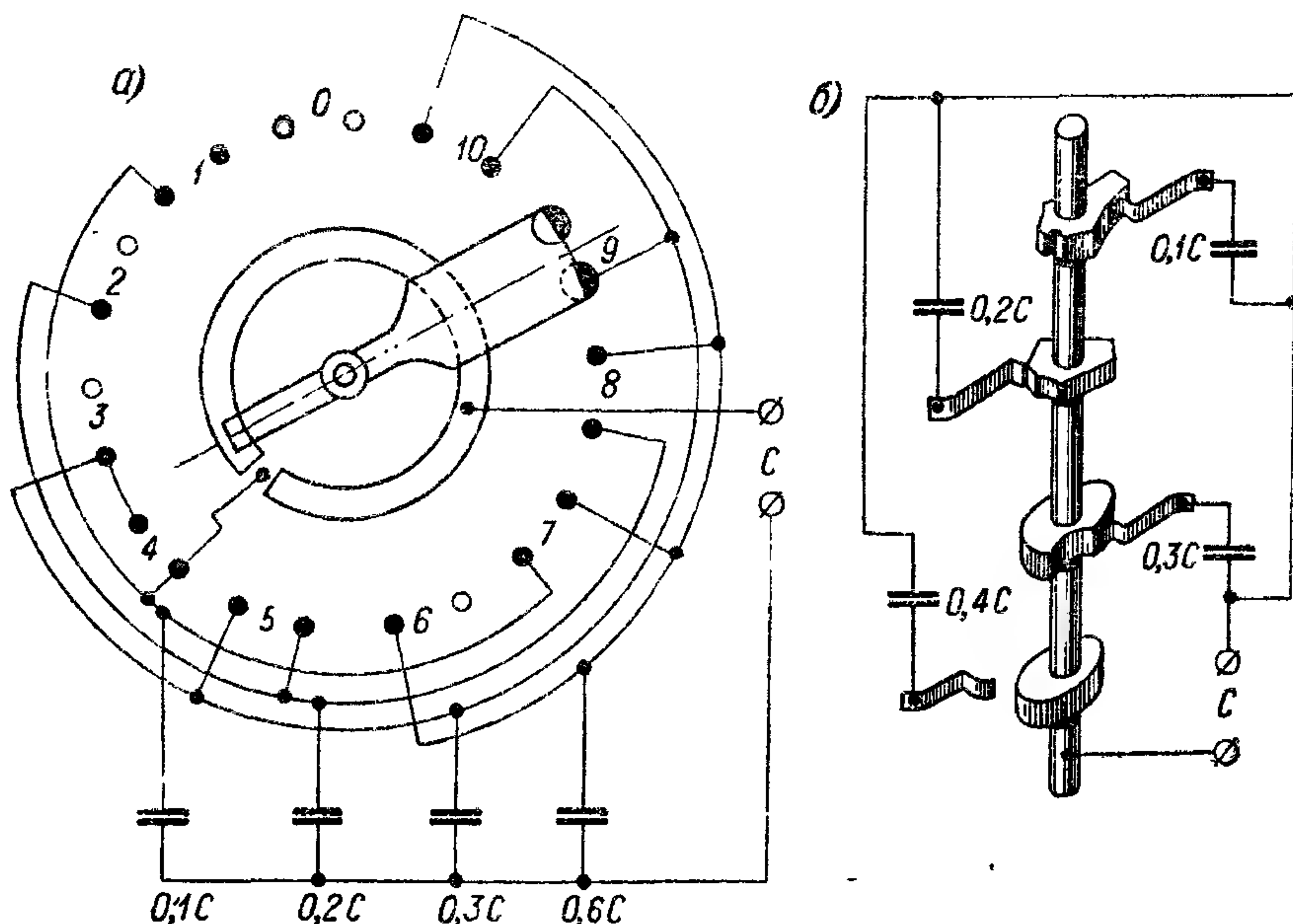


Рис. 172. Схемы рычажного переключения емкости в магазинах декадного типа: а — щеточный переключатель: $C_{\Sigma} = 1,2 C$; б — контроллерный переключатель: $C_{\Sigma} = 1,0 C$.

устройства вышли теперь из употребления, уступив свое место рычажным декадным системам. Современные схемы контактных устройств позволяют использовать для каждой декады только четыре секции, что упрощает подгонку емкости (рис. 172). При работе с магазинами емкости надо учитывать, что монтажные проводники, необходимые для соединения секций с контактами переключающего устройства, неизбежно вносят паразитную емкость, добавочную индуктивность и некоторое активное сопротивление. При установке всех декад на нулевое значение емкости между выводами магазина остается «начальная емкость» порядка нескольких десятков пикофарад. Она складывается из емкости C_1 — между выводами и емкостей C_2 и C_3 — между каждым из выводов и экраном. Поэтому при точных измерениях важно знать, как проводилась подгонка емкости магазина: при

изолированных выводах или при соединении одного из них с экраном и какого именно. По данным одной из английских фирм для выпускаемых ею магазинов емкости было получено: $C_1 = 38 \text{ пф}$, $C_2 = 83 \text{ пф}$ и $C_3 = 14 \text{ пф}$; индуктивность проводников на пути к каждой декаде составляла $100\text{--}200 \cdot 10^{-9} \text{ гн}$ (индуктивность каждой секции порядка $80 \cdot 10^{-9} \text{ гн}$), а активное сопротивление проводников составляло $0,5\text{--}1,5 \cdot 10^{-3} \text{ ом}$. Фирма считала, что такие значения этих параметров не сказываются на работе магазина при частотах до 5 кгц . Некоторые данные о магазинах емкости отечественного изготовления даны ниже:

Тип	Размеры, мм	Вес, кг	$C_{\text{макс}}$, мкф	$C_{\text{нач}}$, пф	Пределы частоты, кгц	Примечание
P 513	$468 \times 180 \times 170$	7,5	1,111	130	0,04—5	С воздушным конденсатором
P 523	$350 \times 180 \times 168$	—	1,11	40	0,04—1,5	—

Испытательное напряжение между выводами 750 в (пост. ток) в течении 10 сек . Эффективное значение переменного напряжения при длительной работе определяется формулой

$$U = \frac{4000}{\sqrt{f[\text{гц}] C[\text{мкф}]}} ,$$

но не должно быть выше 300 в . Сопротивление изоляции при любом положении рукояток — не менее 100 Мом , $\text{tg } \delta$ — не более $1/200$ от основной погрешности, при $C_{\text{макс}}$ это дает значение не более $25 \cdot 10^{-4}$.

При использовании слюдяных конденсаторов в измерительной технике надо иметь в виду, что в отличие от воздушных конденсаторов они имеют относительно большой коэффициент абсорбции (§ 14).

Б. КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

§ 68. Керамические материалы, применяемые в конденсаторостроении

Особенностью керамики как материала для изготовления конденсаторов является прежде всего большое разнообразие значений ϵ и $\text{ТК}\epsilon$. Величина ϵ лежит в пределах от $7,5\text{--}9$ до нескольких тысяч, а величина $\text{ТК}\epsilon$ может иметь как большие положительные и отрицательные значения, так и значения, близкие к нулю. Если ранее керамические конденсаторы представляли собой только высокочастотные конденсаторы малой емкости, обычно до нескольких тысяч пикофард, то теперь изготавливают также и низкочастотные конденсаторы, емкость которых может доходить до нескольких микрофард при небольшом объеме. Вместе с тем нижний предел емкости может составлять доли пикофарда. Рабочее напряжение современных

керамических конденсаторов составляет от нескольких десятков вольт до десятков киловольт. В связи с этим, а также благодаря простоте конструкции и технологии, удобной для массового производства, керамический конденсатор стал одним из наиболее широко применяемых типов конденсаторов в электронной технике.

Согласно ГОСТ 5458—64 керамические материалы разделяются на ряд типов, классов, групп и категорий. ГОСТ предусматривает четыре температурные категории: 1) $-60 \div +85^{\circ}\text{C}$; 2) $-60 \div +125^{\circ}\text{C}$; 3) $-60 \div +155^{\circ}\text{C}$ и 4) $-60 \div +300^{\circ}\text{C}$. К п е р в о м у типу керамических материалов (А) относятся высокочастотные материалы с ϵ выше 12, разделяющиеся на 3 класса и 12 групп (табл. 16) по величине ϵ и ТК ϵ . Поскольку керамические конденсаторы выпускаются только с металлизированными электродами, а коэффициент линейного расширения у них мал, согласно формуле (35) можно считать, что $\alpha_c \approx \alpha_\epsilon$, т. е. ТКЕ \approx ТК ϵ . Угол потерь у этого типа керамики мал и при 20°C и частоте 1 Мгц не должен превышать $6 \cdot 10^{-4}$; после увлажнения он должен быть не более $8 \cdot 10^{-4}$, а при температуре 155°C — не более $10\text{--}12 \cdot 10^{-4}$. Удельное объемное сопротивление при 155°C превышает $10^{10}\text{--}10^{11}$ ом \cdot см. Временное сопротивление изгибу для большинства материалов этого типа превышает 800 кг/см², а коэффициент линейного расширения — менее $8 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. При верхнем пределе ϵ порядка нескольких сотен величина ТКЕ имеет большие отрицательные значения; по мере снижения ϵ снижается и абсолютное значение ТКЕ, причем для класса III (термокомпенсированная керамика) при значениях

Таблица 16

Высокочастотные керамические материалы с $\epsilon > 12$

Класс	Группа	Категория	Пределы ϵ (20°C ; 1 Мгц)	Пределы ТКЕ, град ⁻¹ , $\times 10^6$	$E'_{\text{пр}}$, не ниже кг/мм (50 гц)
I	a	1	230—400	-3300 ± 1000	5
	б	3	130—190	-1300 ± 200	6
II	a	1,3	65—100	-750 ± 100	8
	б	3	45—65	-470 ± 90	
	в	3	40—60	-330 ± 60	
	г	3	35—50	-220 ± 40	
	д	3	30—45	-150 ± 40	
III	a	3	17—55	-75 ± 30	8
	б	1,3	17—50	-47 ± 20	
	в	3	17—45	-33 ± 20	
	г	3	17—40	0 ± 20	
	д	1,3	12—35	$+33 \pm 20$	

$\varepsilon \approx 12-45$ можно получать малые положительные или отрицательные значения ТКЕ, даже меньшие, чем для лучших массовых типов слюдяных конденсаторов (группа z : $\pm 50 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹).

Ранее основным представителем этого типа материалов являлась керамика на основе TiO_2 («Тиконд»), но, как указывалось выше, этот окисел недостаточно устойчив в электрическом поле, особенно при повышенных температурах (см. рис. 36); материал такого вида остался только в группе a класса II как материал первой категории; остальные материалы этого класса представляют собой системы на основе цирконатов и титанатов кальция; материал Ia изготавливается на основе SrTiO_3 , а материал Ib — на основе CaTiO_3 . Термокомпенсированные материалы класса III в большинстве представляют собой двухкомпонентные системы, содержащие вещества с положительным и с отрицательным знаками ТКЕ; однако в этот класс входят и некоторые однокомпонентные системы с малым ТКЕ, например материал на основе NiTiO_3 . Большой набор материалов с различными отрицательными значениями ТКЕ полезен при изготовлении термокомпенсирующих конденсаторов, применяемых для улучшения стабильности частоты высокочастотных контуров. Основные элементы таких контуров: воздушный конденсатор и катушка индуктивности имеют положительные значения ТКЕ и ТКЛ, поэтому частота контура при нагревании уменьшается. Стабильность частоты при колебаниях температуры можно улучшить, присоединяя к воздушному конденсатору небольшой керамический с отрицательным значением ТКЕ.

Ко второму типу керамических материалов (Б) относятся низкочастотные материалы с величиной ε выше 900. Материалы класса V представляют собой сегнетокерамику, обладающую спонтанной поляризацией, для которой характерны высокие значения ε (§ 8). Вместе с тем для подобных материалов характерна сильная зависимость ε от температуры и от напряженности поля, а также большие потери ($\text{tg } \delta \approx 2 \div 5 \cdot 10^{-2}$). Первым из материалов этого типа явился титанат бария BaTiO_3 . Теперь наряду с ним в производстве этих материалов используют также титанаты стронция и кальция, а также цирконат и станнат бария. Изменяя состав сегнетокерамики, можно в значительной степени ослаблять зависимость ε от температуры и напряжения, но за счет снижения величины ε , как показывает табл. 17.

К этому же типу материалов относится материал класса IV, представляющий собой стронций-висмут-титанат. Этот материал (ранее имевший обозначение СВТ) хотя и обладает высокой ε , но не является сегнетоэлектриком; для него характерна электронно-релаксационная поляризация (§ 8), в связи с чем его $\text{tg } \delta$ на порядок величины ниже, чем у сегнетокерамики ($\text{tg } \delta \approx 2 \cdot 10^{-3}$). Это позволяет использовать данный материал при частотах звукового диапазона при достаточной электрической нагрузке, хотя для применения при высоких частотах $\text{tg } \delta$ все же недостаточно мал.

Низкочастотные керамические материалы с $\epsilon > 900$

Класс	Группа	Категория	ϵ , не менее	$\Delta\epsilon_t$, %	$\Delta\epsilon_U$, %	$\operatorname{tg} \delta \times 10^4$, не более (1 кГц)	$E_{\text{пр}}$, не ниже, кВ/мм (50 Гц)
IV	—	2	900	± 30	± 10	20	5
V	a	2	1400	± 10	± 10	250	4
	б	2	2000	± 20	± 10	250	4
	в	3	2500	± 30	± 20	500	4
	г	1	3000	± 50	± 30	300	3
	д	1	4000	± 70	± 30	300	3
	e	1	8000	Не нормируется	± 30	300	3

В табл. 17 величина $\Delta\epsilon_t$ характеризует пределы изменения ϵ в температурном интервале от -40 до $+85^\circ \text{C}$, а величина $\Delta\epsilon_U$ —

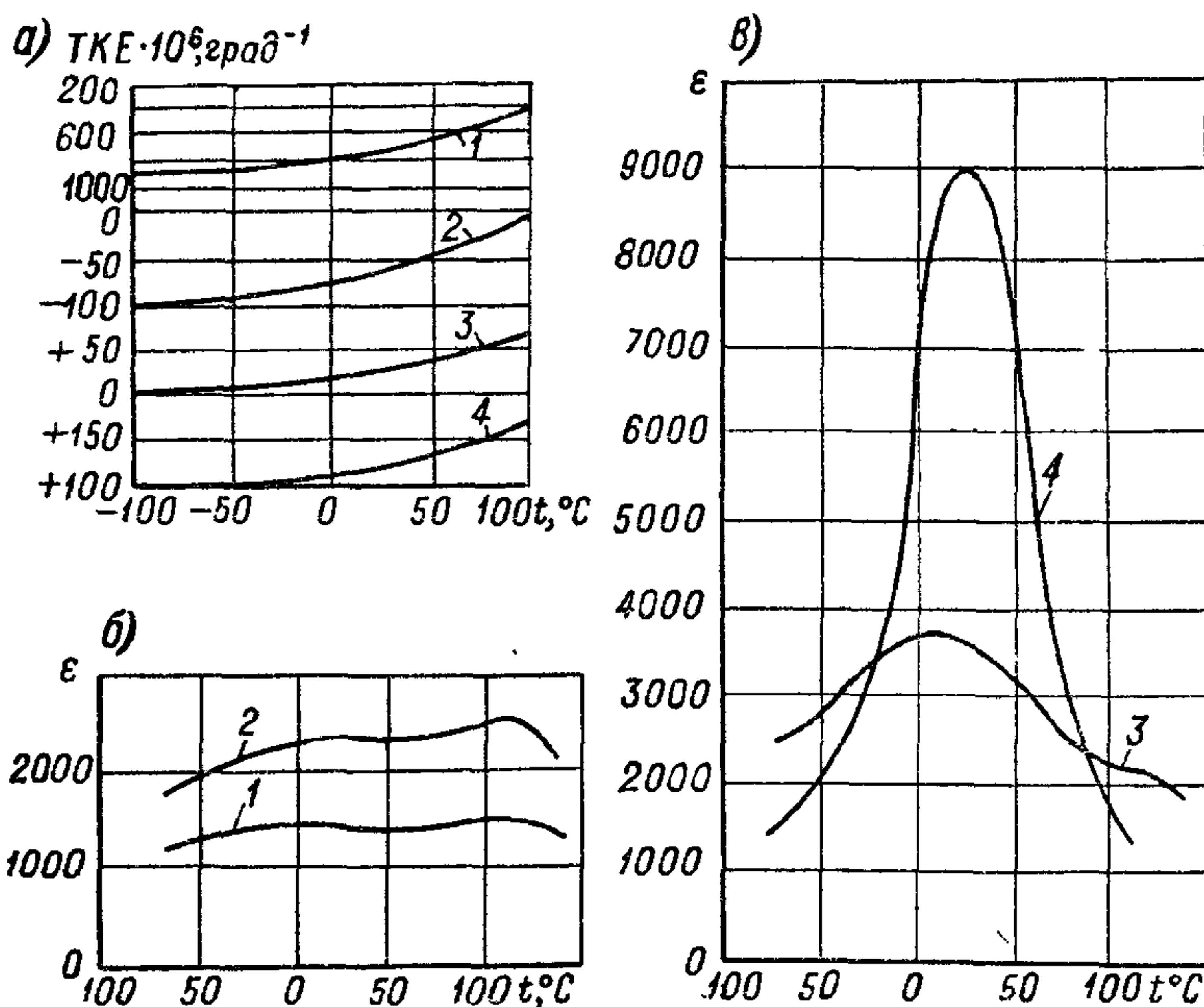


Рис. 173. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости керамических материалов: а — зависимость TKE от температуры для трех материалов первого типа

(1 — II а; 2 — III б; 3 — III д) и для установочной керамики (4); б и в — зависимость ϵ от температуры для четырех материалов второго типа (1 — V а, 2 — V в, 3 — V г, 4 — V е).

пределы изменения ϵ при изменении напряженности поля от 0 до 0,5 кВ/мм. Величина ρ_{06} для материалов этого типа при 85°C превышает $10^{11} \text{ ом} \cdot \text{см}$ (для материала V е — $10^{10} \text{ ом} \cdot \text{см}$). Вре-

менное сопротивление изгибу выше 600 кг/см^2 , а $\alpha_d < 12 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Для керамики первого типа изменение ϵ с температурой близко к линейному, хотя и не строго линейно, так как ТКЕ несколько зависит от температуры (рис. 173, а); для керамики второго типа характерна заведомо нелинейная зависимость ϵ от температуры (рис. 173, б и в, рис. 7, г и з). Угол потерь керамики первого типа мал и начинает возрастать только в области высоких температур за счет потерь на проводимость (см. рис. 56, а), причем тем раньше, чем ниже частота; для керамики второго типа угол потерь велик, но снижается при нагревании (рис. 174).

К третьему типу керамики (В) относятся высокочастотные материалы с величиной ϵ меньше 12 (установочная керамика). Этот вид керамических материалов не предназначен для изготовления конденсаторов и используется для производства высокочастотных изоляционных деталей, которые не должны иметь большой емкости (изоляторы, ламповые панельки, переходные колодки и т. п.). К установочной керамике относятся ряд материалов (ультрафарфор, стеатит, алюминоксид), изготавливаемых из других типов окислов, чем конденсаторная керамика (Al_2O_3 , SiO_2 , MgO и др.). Материалы этого типа имеют небольшую ϵ , порядка

7,5—9, и характеризуются положительным ТКЕ порядка $400 \div 120 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Большинство из них имеют $\text{tg } \delta$ такого же порядка, как у керамики первого типа, но отличаются повышенной электрической прочностью ($E_{\text{пр}} \approx 20 \div 25 \text{ кВ/мм}$) и повышенной механической прочностью (до $1500\text{—}2000 \text{ кг/см}^2$); их удельное сопротивление при 155°C обычно выше $10^{12}\text{—}10^{13} \text{ ом}\cdot\text{см}$. Подобные материалы используются в конденсаторостроении, когда надо получить конденсатор с повышенным положительным значением ТКЕ и небольшой емкостью, а также при изготовлении конденсаторов очень малой емкости. Эти материалы вследствие их повышенной электрической и механической прочности удобны также для изготовления высоковольтных керамических конденсаторов, когда от них не требуется большая емкость.

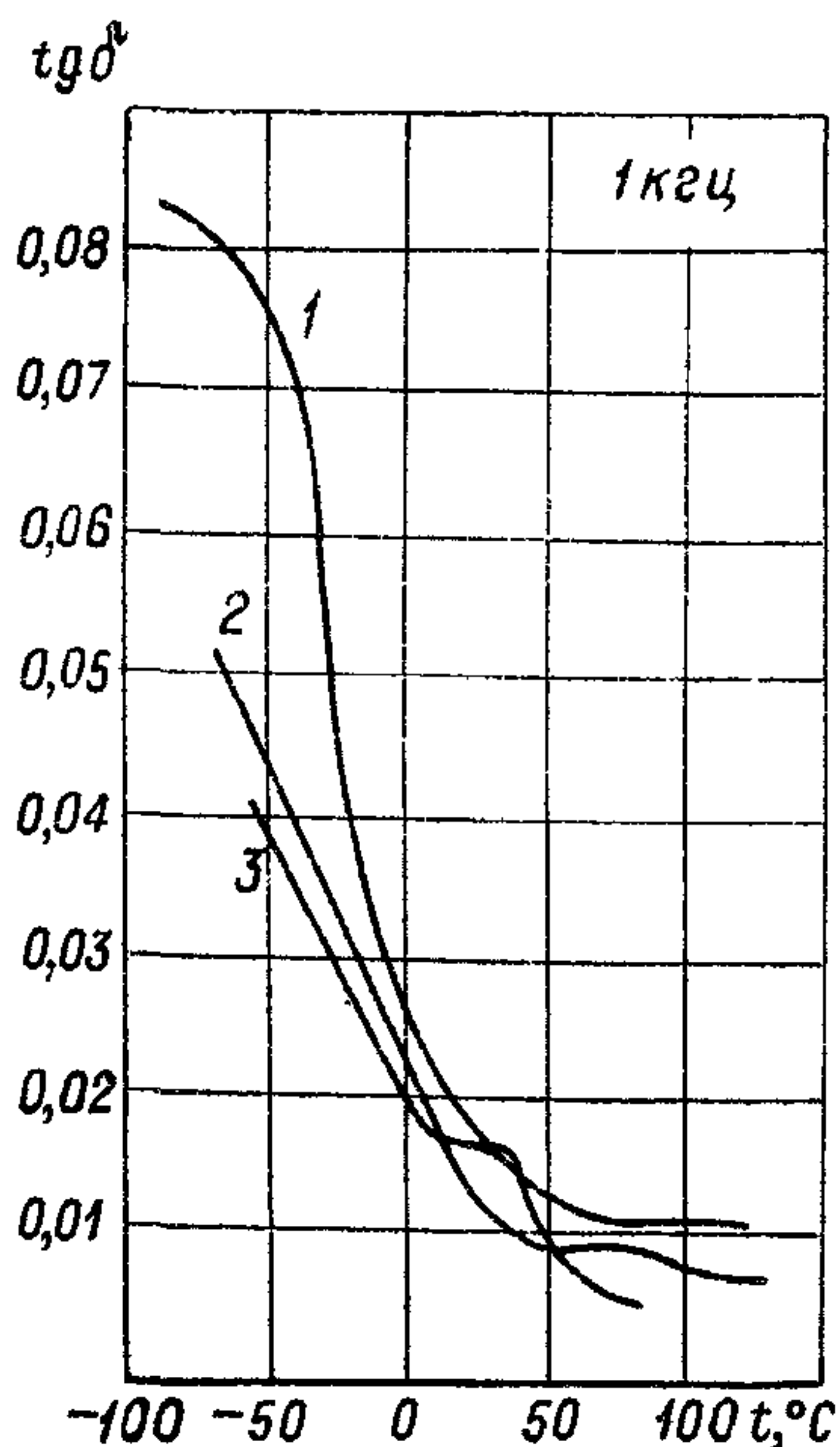


Рис. 174. Температурная зависимость угла потерь трех керамических материалов второго типа:

1 — Ва, 2 — Vz, 3 — Ve.

§ 69. Общие сведения о технологии керамических конденсаторов

В качестве исходных продуктов в производстве керамических конденсаторов применяются как природные сырьевые материалы: глина, тальк, мрамор, так и продукты, поставляемые химической промышленностью: двуокись титана, двуокись циркония, углекислый барий и др.

Природное сырье необходимо очищать от посторонних включений и загрязнений примесями. Особенно опасны примеси окислов железа, удаление которых производят магнитной сепарацией. Некоторые из исходных материалов подвергают предварительному обжигу, дроблению и просеиванию.

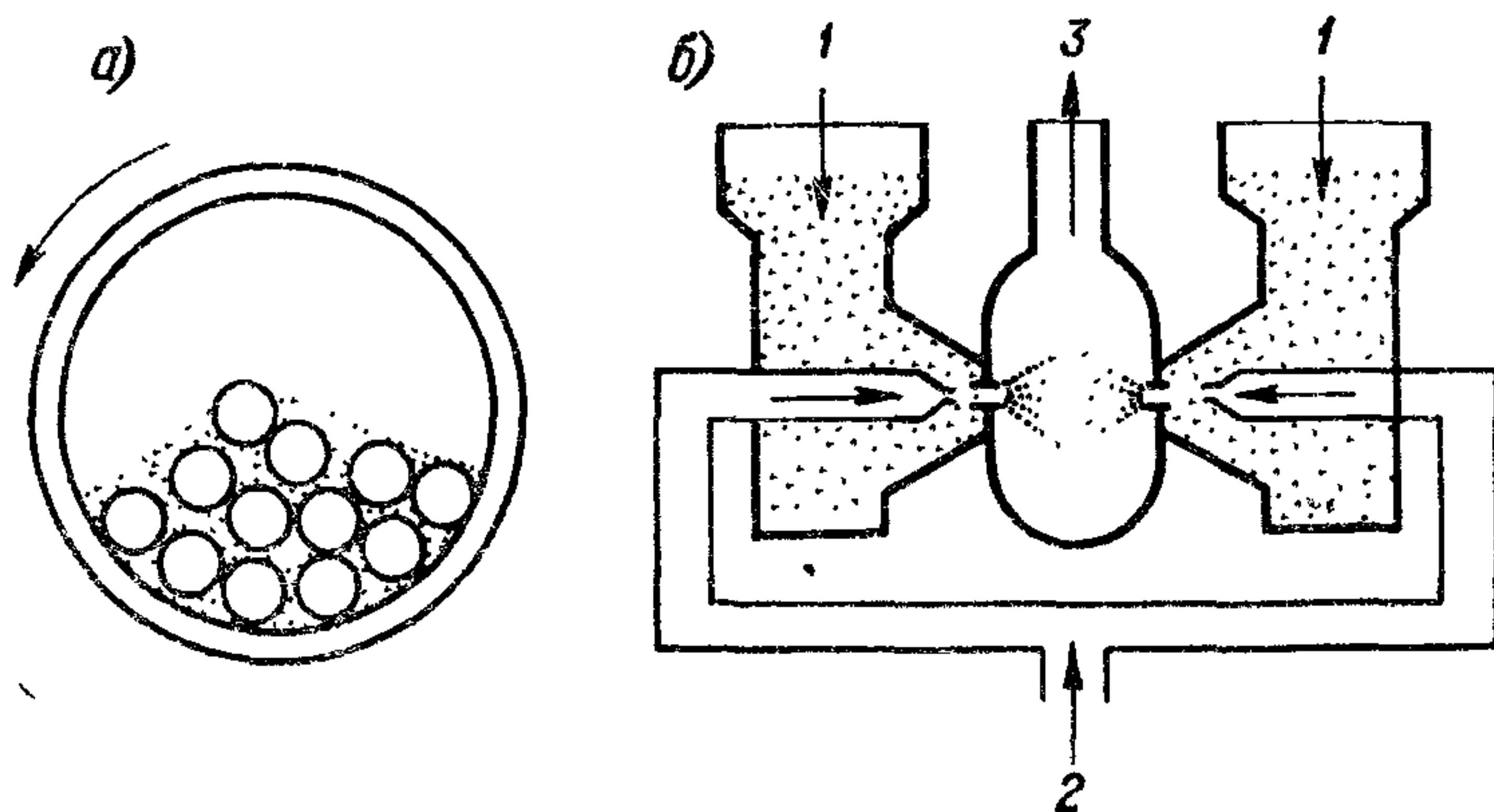


Рис. 175. Схемы установок для размолва керамических масс:
а — шаровая мельница; б — струйная мельница.

Для получения керамической массы нужного состава производится измельчение и смешивание входящих в нее компонентов на шаровой мельнице, представляющей собой цилиндрический барабан, в который закладываются размалывающие шары и измельчаемый материал (рис. 175, а). Коэффициент заполнения мельницы обычно порядка 0,7—0,9; соотношение веса размалываемого материала к весу шаров — от 1 : 4 до 1 : 12. Обычно проводят мокрый помол в присутствии воды и получают жидкую массу — шликер, которая затем обезвоживается на фильтр-прессе. С фильтр-пресса керамическая масса снимается в виде пластичных коржей с влажностью порядка 22—25%. После сушки и дробления можно получить из коржей массу в виде сухого порошка.

На обычных шаровых мельницах помол длится 16—48 ч. Значительное ускорение размолва массы и увеличение степени ее измельчения можно получить, применяя вибропомол на шаровых мельницах, испытывающих кроме вращения также и вибрацию с частотой до 800 ударов в секунду. Продолжительность

вибропомола около 1—2,5 ч. При этом оказывается возможным использовать даже стальные шары, не опасаясь заметного попадания железа в массу ввиду малой продолжительности ее соприкосновения с шарами.

Степень дисперсности частиц керамической массы, полученной при длительном размоле на шаровой мельнице, характеризуется большим разбросом: от 1 до 100 $\mu\text{м}$, с большим содержанием крупных частиц. Это ограничивает возможность получения керамического диэлектрика малой толщины.

В современное керамическое производство начинает внедряться способ вихревого помола с использованием вихревых (струйных) мельниц (рис. 175, б), в которых с помощью сжатого воздуха или пара осуществляется столкновение двух потоков предварительно измельченной керамической массы. Дополнительное измельчение происходит за счет соударения частиц массы друг о друга. По данным одной из фирм (США), этим методом можно получать керамический порошок, содержащий 90% частиц менее 2,7 $\mu\text{м}$ и из них 28% частиц менее 1 $\mu\text{м}$. Используя такую степень измельчения, фирма считает возможным снизить толщину керамического диэлектрика до 25 $\mu\text{м}$, т. е. до средней толщины слюдяных пластинок.

Для оформления изделий из керамических масс существует ряд способов. Из них для изготовления заготовок в производстве керамических конденсаторов используют следующие методы:

1) **п р е с с о в а н и е** из сухого порошка применяется для изготовления дисковых конденсаторов; заготовки прессуются на ручных рычажных прессах в специальных пресс-формах при удельном давлении до 800—1000 $\text{кг}/\text{см}^2$. Перед прессованием порошок увлажняют (до 6—10% влаги) или вводят в него органическую связку (например, 6—8% парафина). Обычная толщина прессованных дисков 0,5—1 мм ; применяя специальную методику прессования и поливиниловый спирт в качестве связки, можно получать толщину порядка 0,2—0,3 мм ;

2) **п р о т я ж к а т р у б о к** из пластичной массы применяется при изготовлении трубчатых конденсаторов; влажная масса в виде коржей, снятых с фильтр-пресса, поступает на вакуум-машину («вакуумтонштейдер») (рис. 176), где происходит уплотнение массы под вакуумом порядка 76 $\text{см рг} \approx 200 \text{ мм рт. ст.}$ для удаления из массы воздушных включений. Из вакуум-машинки масса выходит в виде заготовки, поступающей на пресс для вытяжки трубок. Для того чтобы увеличить пластичность массы, в нее вводят пластификаторы: декстрин, тунговое масло и др. Длина трубчатых заготовок берется значительно больше длины конденсаторов, так что после обжига трубки должны подвергаться резке на несколько частей. При небольшом диаметре трубок протяжка позволяет получать толщину стенок до 0,2—0,3 мм ;

3) л и т ь е и з ж и д к о й м а с с ы (шликера) в г и п с о - в ы е ф о р м ы применяется при изготовлении конденсаторов высокого напряжения, например, горшкового типа. Стенки гипсовой формы отнимают воду из массы и последняя постепенно загустевает, начиная от стенок формы и далее в направлении к ее центру. Когда около стенок нарастает слой загустевшей массы достаточной толщины, избыток шликера, оставшийся еще жидким в средней части формы, сливается. После подсушки можно раскрыть форму и вынуть из нее заготовку. Для получения более точных размеров после подсушки (иногда после пропитки парафином для уменьшения отделения пыли) заготовки подвергают

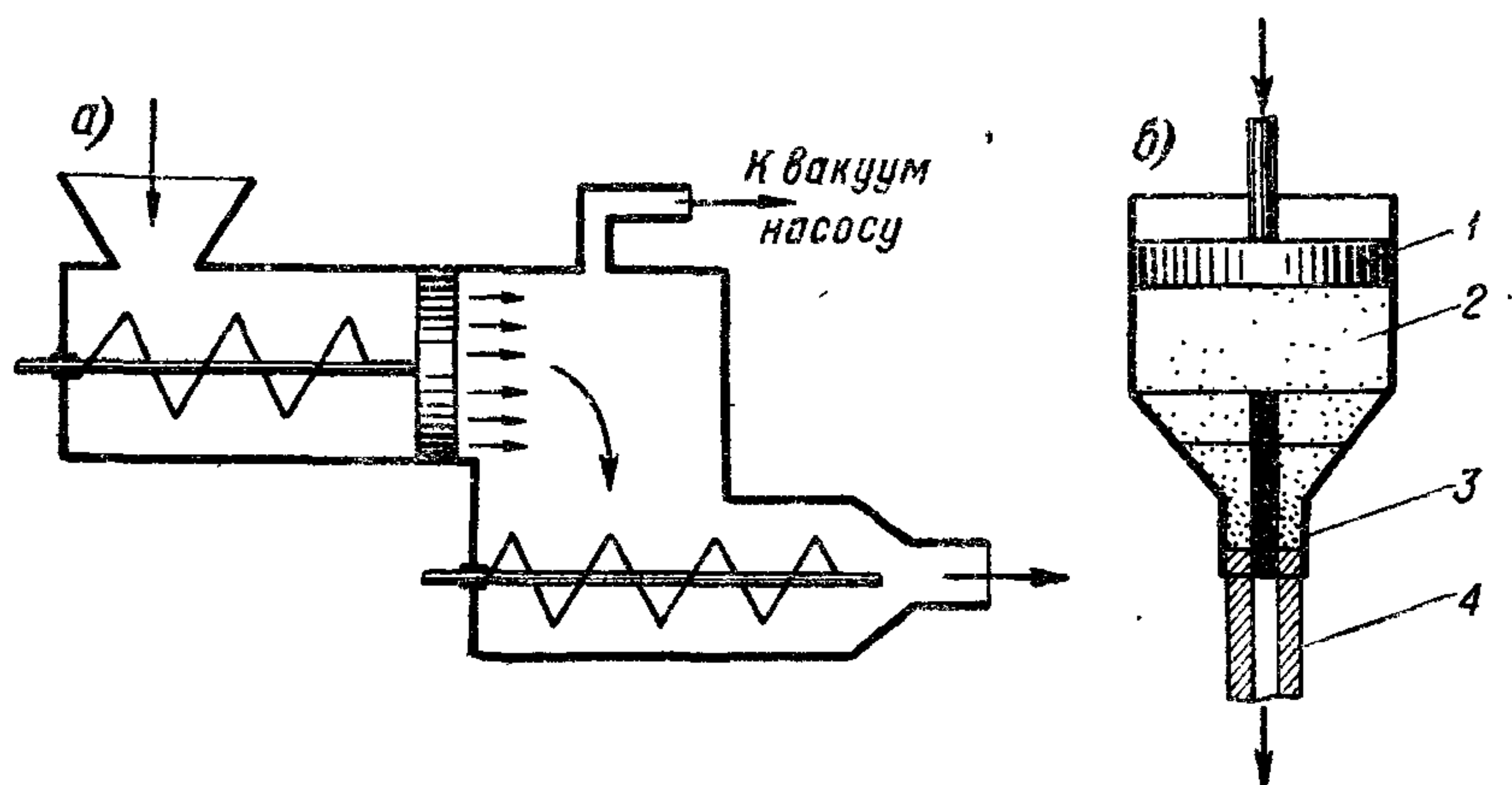


Рис. 176. Схема изготовления керамических трубок: а — вакуум-малка для подготовки пластичной массы; б — протяжка (выдавливание) трубки на прессе.

1 — поршень; 2 — масса; 3 — мундштук; 4 — трубка.

обработке на токарном станке. Метод литья дает более высокие значения $E_{пр}$, чем прессовка или протяжка, что имеет большое значение для изготовления высоковольтных конденсаторов. Толщина стенок литых изделий — не менее нескольких миллиметров;

4) г о р я ч е е л и т ь е применяется при изготовлении конденсаторов сложной формы, в частности для производства «секционных» (щелевидных) конденсаторов типов КЛГ или КЛС (рис. 177, а и б). Предварительно обожженная размолотая керамическая масса смешивается с легкоплавким пластификатором (парафин с добавкой стеарина или пчелиного воска) в количестве 25—30% от общего объема. При температуре 70—90° С жидкий шликер под давлением 4—5 атм поступает в форму, где застывает при охлаждении. Термическая обработка литых заготовок состоит из двух этапов: удаления пластификатора (связки) и спекания керамики (обжига). Первый этап проводится при нагреве до 180—200° С. Толщина стенок в щелевидных конденсаторах со-

ставляет 0,2—0,5 мм, а толщина щелей, в которых создаются обкладки, 0,1—0,2 мм;

5) литье керамических пленок с последующей вырубкой из них дисков малого диаметра применяется при изго-

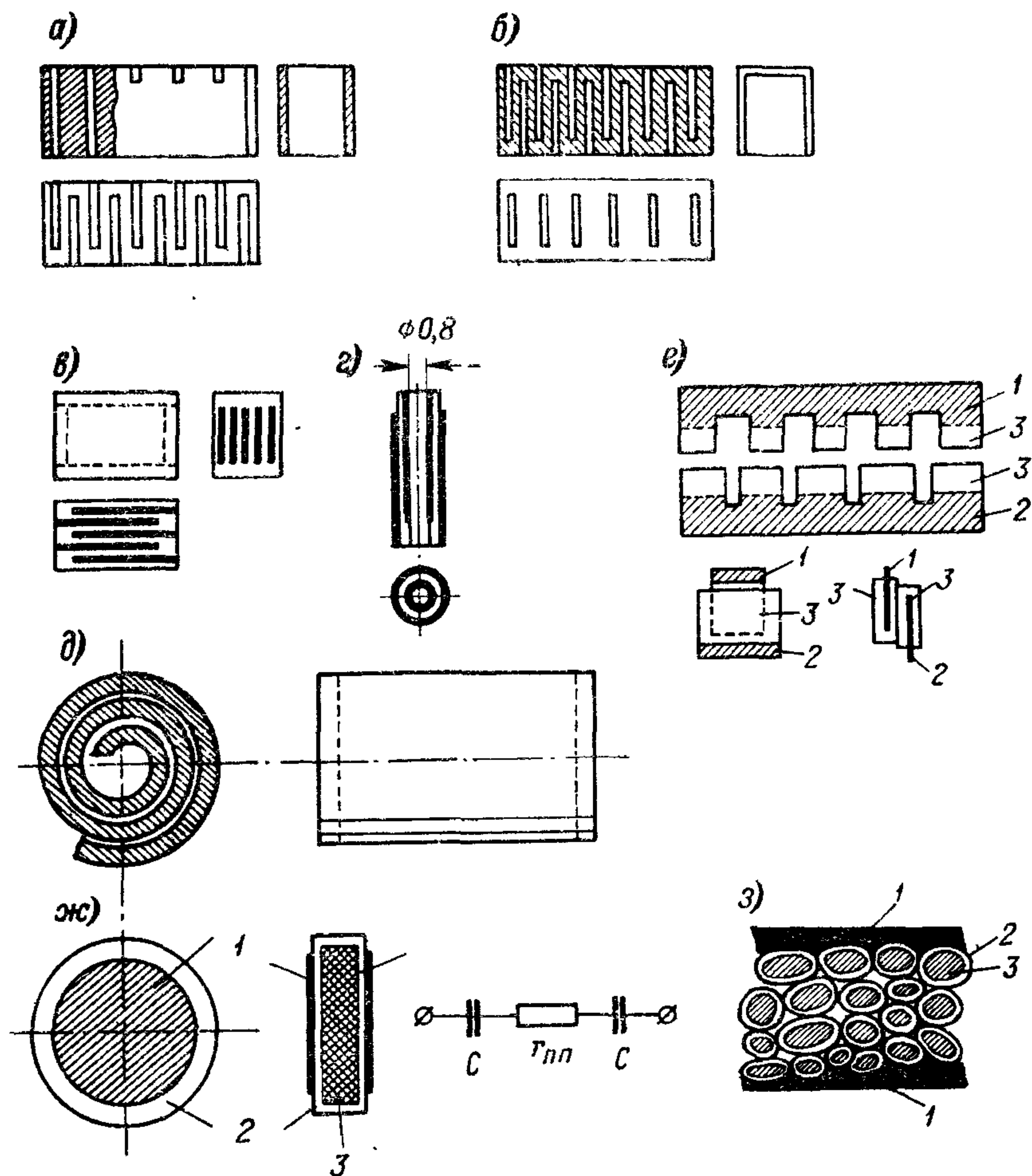


Рис. 177. Схемы конструкций конденсаторов с увеличенной удельной емкостью: а — секционный со сквозными прорезями; б — секционный с глухими прорезями; в — монолитный; г — церафил; д — церол; е — фольговокерамический (1 — фольга с узкими зубцами; 2 — фольга с широкими зубцами; 3 — слой шликера на фольге); ж — с барьерным слоем; з — с пограничным слоем.

товлении миниатюрных конденсаторов. Шликер, приготовленный на поливиниловом спирте, заливается вбачок (рис. 178), откуда он тонким слоем откладывается на движущуюся металлическую ленту, покрытую тонким слоем лака, чтобы предотвратить прилипание керамики к металлу. Движущаяся лента несет керамическую пленку к сушильному устройству, где она просушивается

с помощью инфракрасных ламп, после чего снимается с движущейся ленты. При небольшом объеме производства иногда применяют самодвижущийся бачок с шликером, откладывающий пленку в виде ленты на неподвижную поверхность. Из керамической пленки, полученной тем или иным способом, вырубается диски диаметром несколько миллиметров с помощью ручного штампа. Толщина подобных дисков может достигать 0,1—0,15 мм.

Отформованные и просушенные керамические заготовки поступают в обжиг, являющийся весьма ответственным этапом керамической технологии. Процесс обжига можно разделить на три основные стадии: подъем температуры, выдержка при максималь-

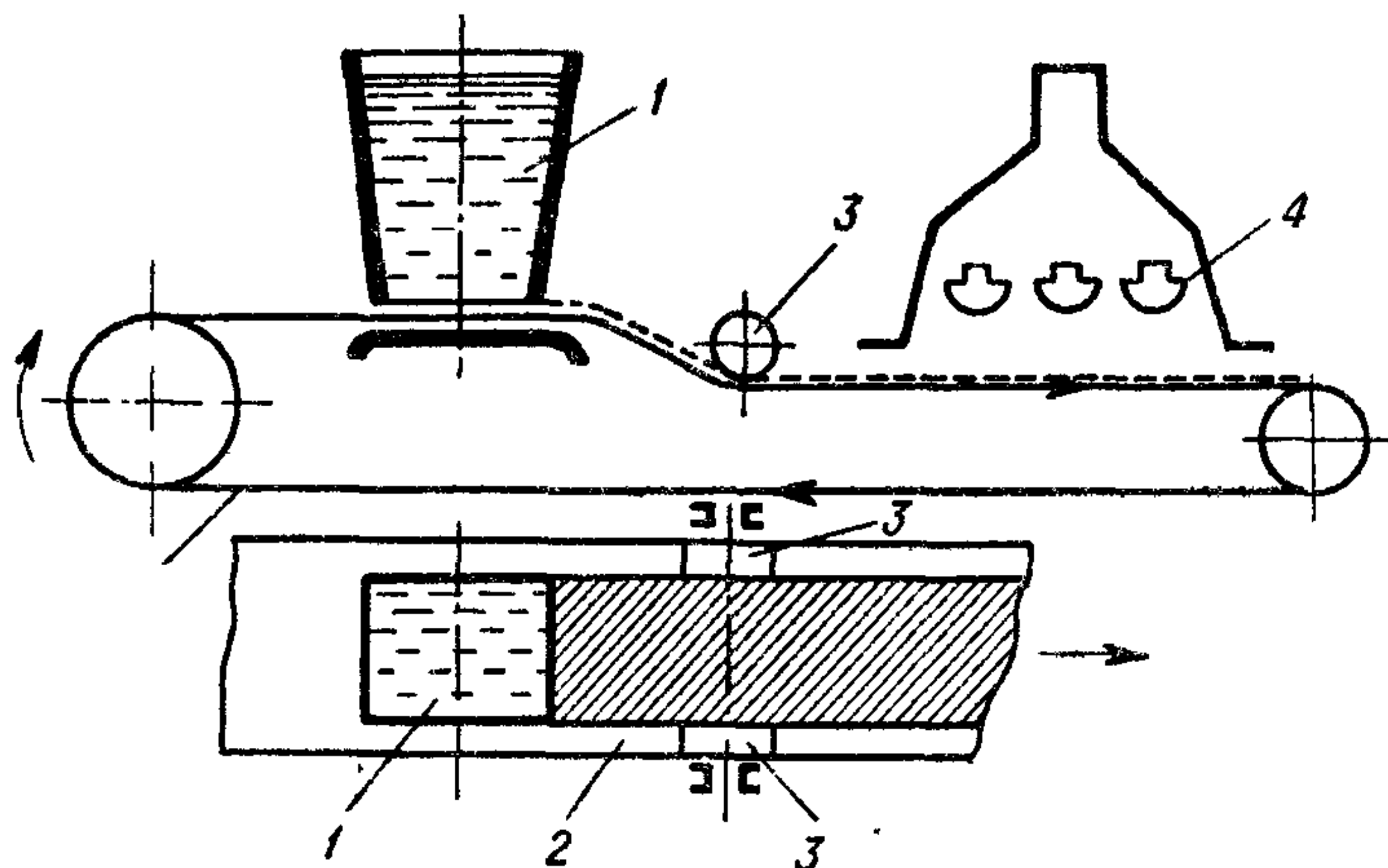


Рис. 178. Схема получения тонких керамических пленок методом отливки.

1 — шликер; 2 — конвейерная лента; 3 — ограничивающие валики;
4 — сушильное устройство с инфракрасными лампами.

ной температуре (обычно порядка 1300—1400° С в зависимости от типа керамики) и охлаждение.

В течение первой стадии происходит испарение остаточной влаги, удаление конституционной воды, входящей в качестве компонента в состав некоторых видов сырья, полное выгорание органических примесей, введенных в керамическую массу, и частично начинается расплавление более легкоплавких компонентов массы. В течение второй стадии расплавившаяся часть компонентов пропитывает всю массу изделия и в ее среде происходит процесс растворения более легкоплавких компонентов с образованием новых соединений. В течение третьей стадии происходит затвердевание полученной массы, которое должно происходить достаточно медленно и равномерно, чтобы не произошло механического разрушения изделий. Следует иметь в виду, что в ряде составов керамических масс реакции образования новых соединений в процессе обжига (спекания) могут идти непосредственно в твердой фазе без непременно участия жидкой фазы.

В зависимости от состава массы и размеров изделий приходится выбирать значения максимальной температуры обжига и скорость подъема и снижения температуры. Большую роль играет и газовая среда, в которой происходит обжиг и которая может быть окислительной (при избытке воздуха), нейтральной или восстановительной (при недостатке воздуха и неполном сгорании топлива, когда в газовой среде присутствует окись углерода CO).

Массы, содержащие большое количество окиси титана, при обжиге в восстановительной среде дают конденсаторы с резко ухудшенными электрическими свойствами, так как при восстановлении TiO_2 в низшие окислы последние оказываются полупроводниками с проводимостью, превышающей в 10^{11} — 10^{12} раз проводимость исходной двуокиси.

Массы, содержащие большие количества Al_2O_3 , наоборот, не допускают обжига в окислительной среде, так как при этом получается β -модификация глинозема, имеющая резко ухудшенные электрические свойства по сравнению с α -модификацией, получаемой при обжиге в нейтральной среде.

Для некоторых керамических масс требуется восстановительная среда на первой стадии обжига и сильноокислительная на последующей стадии.

Обжиг заготовок керамических конденсаторов производят в пламенных печах периодического действия (горнах), отапливаемых мазутом или сланцевым маслом, или в туннельных печах непрерывного действия с электрическим или газовым нагревом.

Обычно применяются горны с большим объемом рабочего пространства: 5—15 m^3 ; средняя продолжительность обжига в таких печах порядка 48 ч. Результат обжига в таких печах можно узнать только после прохождения значительного времени с момента закладки изделий в печь; кроме того, в рабочем пространстве таких печей существует значительный перепад температур, обычно не менее 50—70° С. Ранее в таких печах было затруднительно соблюдать точный график изменения температуры и создавать нужную газовую среду. Теперь разработана автоматическая аппаратура, позволяющая вести подъем температуры точно по заданному графику, автоматически регулируя подачу топлива форсунками с одновременным управлением количеством воздуха, подаваемого в печь, для обеспечения постоянства газовой среды, состав которой контролируется газоанализатором.

Туннельные печи обеспечивают непрерывность процесса обжига, что само по себе уже является прогрессивным обстоятельством в условиях такого массового производства, которым является сейчас производство керамических конденсаторов. Испытание деталей, выталкиваемых с промежутками 10—15 мин из туннельной печи, позволяет в случае необходимости тут же ввести коррективы в режим обжига, чего мы лишены при работе с горнами.

В туннельных печах легко обеспечить устойчивую нейтральную или слабоокислительную газовую среду, легче обеспечить равномерность подъема температуры и охлаждения и получить малый перепад температур в рабочем объеме. Вследствие указанных преимуществ туннельные печи все шире применяются в керамическом производстве.

Обожженные заготовки керамических конденсаторов: трубки (нарезанные после обжига на куски заданной длины), диски и т. д. подвергаются операции серебрения методом вжигания (§ 22) для образования обкладок конденсатора, после чего к обкладке припаиваются выводы. Далее на конденсаторы наносится влагозащитный слой путем лакировки или покрытия слоем компаунда, после чего производятся электрические испытания конденсаторов и их маркировка. Предварительные электрические испытания (испытание на пробой и измерение емкости) проводят также на серебряных заготовках до припайки выводов.

Массовость выпуска керамических конденсаторов, особенно трубчатого типа, делает весьма актуальным повышение производительности труда на всех операциях за счет механизации и автоматизации. Созданы автоматы для выполнения таких операций, как серебрение и припайка выводов; контроль электрических характеристик также ведется с помощью автоматических контрольных устройств. В порядок дня ставится проблема создания автоматических линий для производства наиболее массовых типов керамических конденсаторов.

Как следует из приведенных здесь данных, приемами обычной керамической технологии удастся получить минимальную толщину стенки порядка 0,2 мм (200 мкм) для трубок и щелевидных конденсаторов и порядка 0,1 мм — для пленочных конденсаторов. Однако увеличение хрупкости керамики при снижении толщины стенки заставляет применять пленки толщиной 0,1 мм только в виде малых дисков с небольшой площадью обкладок, что ограничивает величину $C_{\text{ном}}$. При площади электрода 0,2 см² (\varnothing 5 мм) и толщине диэлектрика 0,01 см даже при $\epsilon = 8000$ можно получить емкость только 14 000 пф; на трубочках при таком же значении ϵ получают емкость до 100 000 пф (0,1 мкф), но с относительно плохими удельными характеристиками, так как внутренний объем трубки не используется. Фактически для таких трубок $c_{\text{уд}}$ около 0,15 мкф/см³. Щелевидная конструкция, обеспечивая компактное размещение ряда пластинок, соединяемых параллельно, позволяет повысить $c_{\text{уд}}$ до 0,3—0,4 мкф/см³ при таком значении ϵ , но практически эти конденсаторы изготовляют из масс с наибольшим значением $\epsilon = 3000$, получая $c_{\text{уд}} \approx 0,165$ мкф/см³ (емкость 33 000 пф при размерах конденсатора 10 × 4 × 5 мм); при напряжении 75 в это дает удельный заряд порядка 12,5 мкк/см³.

Применяя вихревой помол, можно снизить средний размер частиц керамической массы и получить толщину диэлектрика ниже 0,1 мм, но при этом прочность его будет недостаточной для

дальнейшей переработки обычными приемами. Поэтому задачу дальнейшей миниатюризации керамических конденсаторов пришлось решать путем использования новых идей в технологии и конструкции. Наиболее плодотворной из них явилась идея по созданию монолитного конденсатора (рис. 177, в), изготовляемого из тонких керамических пленок с органическим пластификатором (например, на основе каучука), которые подвергаются металлизации до обжига, а не после него, как обычно. Из металлизированных сырых керамических пленок, собранных стопкой, получается многопластинчатый плоский конденсатор, приобретающий после обжига вид монолитного блока. При этом толщина обожженного конденсатора определяется уже не толщиной одной пленки, а суммарной толщиной пленок, сложенных в стопку; это обеспечивает достаточную механическую прочность конденсатора даже при толщине пленок менее 0,1 мм.

При напряжении 50 в для первых серий монолитных конденсаторов с небольшим числом пленок была получена $c_{уд}$ до 0,2—0,3 мкф/см³. Увеличивая число пленок в стопке и снижая их толщину, можно рассчитывать на увеличение $c_{уд}$ до 1—2 мкф/см³; при толщине пленки 30—35 мкм можно получить $c_{уд}$ до 10—20 мкф/см³. Площадь пленок берется от 3 × 4 до 12 × 12 мм. Поскольку металлизация проводится до обжига, металл обкладок подвергается воздействию высокой температуры в процессе обжига, и серебро, имеющее точку плавления ниже 1000° С, не применяется.

Для замены серебра надо брать тугоплавкие металлы, причем неокисляющиеся, так как широко применяемые керамические массы требуют обжига в окислительной среде. Такими металлами являются платина и палладий; оба они дефицитны и дороги, что повышает стоимость монолитных конденсаторов и ограничивает развитие их производства. Можно удешевить монолитные конденсаторы, если удастся разработать такую рецептуру керамики с высокой ϵ , которая позволит проводить обжиг в восстановительной среде. В этом случае можно будет применить более дешевые тугоплавкие неблагородные металлы: молибден, никель и др.

По данным Герберта (США), добавляя в состав керамики, изготовленной на основе титаната бария, несколько процентов MnO_2 , можно получить материал, пригодный для обжига в восстановительной среде. Такой тип диэлектрика позволил применить в конденсаторах монолитного типа никелевые электроды. При номинальных напряжениях 50, 150 и 300 в предельные значения емкостей получены, соответственно равные 3; 1,5 и 0,45 мкф. Подбирая рецептуру керамики, удалось также изготовить монолитные высокочастотные конденсаторы с никелевыми электродами при максимальной емкости 0,01 мкф с $TKE = \pm 15 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ и $\text{tg } \delta \approx 5 \cdot 10^{-4}$.

В практике США кроме пластинчатой монолитной конструкции известна намотанная конструкция (также из металлизированных

сырых пленок с последующим обжигом), получившая название *ц е р о л* (рис. 177, *д*). В рекламе указывалось, что при использовании материалов с высокой ϵ при напряжении 100 в для этой конструкции можно получать до $1\text{--}3 \text{ мкф/см}^3$ ($q_{\text{уд}} = 100 \div \div 300 \text{ мкк/см}^3$). Меньшие номинальные и удельные емкости дает конструкция *ц е р а ф и л* (рис. 177, *е*), в которой на металлизированный керамический стерженец диаметром 0,8 мм наносится тонкий слой керамической массы путем погружения в шликер. После подсушки и обжига наносится способом металлизации второй электрод. Если надо увеличить емкость, то можно получать многослойные покрытия, чередуя слои керамики и металла. Толщина диэлектрика в таких конденсаторах порядка 50—75 мкм. Используя сегнетокерамику, можно получить емкость 1000 пф при наружном диаметре 2,25 мм и длине 8,1 мм и 0,1 мкф — при диаметре 7,7 мм и длине 19 мм. Это дает $c_{\text{уд}}$ до $0,1 \text{ мкф/см}^3$. Снижение толщины диэлектрика до 25—30 мкм даст возможность дополнительно увеличить удельную емкость.

Новым типом конденсатора с уменьшенной толщиной диэлектрика является *ф о л ь г о - к е р а м и ч е с к и й к о н - д е н с а т о р*. При его изготовлении используется шликер, полученный из обожженной и размолотой керамики заданного состава, с жидкой алюмофосфатной связкой. В жидкий шликер погружается гребенка из алюминиевой фольги, на зубцах которой откладывается тонкий слой керамической массы (рис. 177, *е*). Используются гребенки двух размеров, с более узкими и более широкими зубцами, которые после нанесения покрытия складываются в стопки с чередованием широких и узких зубцов. Зажатые стопки подвергаются нагреву для спекания. Необходимая температура нагрева определяется составом минеральной связки и лежит ниже температуры плавления алюминия, что позволяет использовать обкладки из алюминиевой фольги. Отрезая зубцы гребенок и удаляя излишек фольги, получают секции конденсаторов, которые герметизируются в керамических коробочках, заливаемых с торца легкоплавким стеклом¹. Эта технология позволяет снизить толщину диэлектрика до 10—15 мкм. Конденсаторы этого типа были созданы как высокочастотный тип конденсатора с малым $\text{tg } \delta$ и стабильной емкостью; в связи с этим в них не использованы массы с высокой ϵ , что ограничивает возможность получения высоких значений $c_{\text{уд}}$ даже при тонком диэлектрике.

Резкое снижение толщины диэлектрика до величины менее 1 мкм получено в так называемых *к о н д е н с а т о р а х с б а р ь е р н ы м с л о е м* (рис. 177, *ж*), иначе называемых конденсаторами из восстановленной керамики. При их изготовлении диск из титановой массы (на основе TiO_2 или BaTiO_3) подвергается обжигу в восстановительной среде и превращается в полупровод-

¹ Недавно предложено опрессовывать секции конденсаторов стеклом, как в производстве стеклопленочных конденсаторов (§ 72).

ник. Далее с наружной поверхности диска производится окисление, создающее тонкий слой диэлектрика. Нанося на окисленную поверхность металлические электроды с обеих сторон диска, получаем конденсатор, состоящий из двух последовательно включенных емкостей C , разделенных активным сопротивлением $r_{пп}$ полупроводящей керамики. У каждой из этих емкостей наружной обкладкой служит металлический слой, а внутренней — полупроводниковая керамика. Наличие последовательно включенного сопротивления $r_{пп}$ вызывает увеличение угла потерь конденсатора [формула (102)] и заставляет относить конденсатор с барьерным слоем к числу низкочастотных конденсаторов. Если рассчитать емкость такого конденсатора на полную толщину керамического диска, то эффективное значение $\epsilon_{эфф}$ оказывается огромным, при керамике с $\epsilon \approx 7000$ оно достигает значений порядка 300 000—500 000. При малых напряжениях, порядка 3—5 в, на небольших дисках с диаметром несколько миллиметров можно получать $C_{ном}$ до 0,5—2 мкф при толщине дисков 0,5—0,7 мм. Это дает значения $\epsilon_{уд}$ порядка 2—8 мкф/см³, т. е. несколько выше, чем для монолитных конденсаторов, но не так уж много, если исходить из огромных значений $\epsilon_{эфф}$. В данном случае увеличение $\epsilon_{уд}$ ограничивается относительно большой толщиной полупроводящей части диска, играющей роль обкладок, увеличивающих объем конденсатора. Удельный заряд для таких конденсаторов равен 10—25 мкк/см³. Недостатком конденсаторов с барьерным слоем является большой ток утечки; их сопротивление изоляции измеряется не в мегомах, а в килоомах (табл. 18, ниже).

В Японии был предложен новый вариант этой идеи, а именно, использование дисков, прессованных из крупинок полупроводящей керамики, причем на каждой из крупинок создается тонкий слой диэлектрика. В этом случае между металлическими обкладками, нанесенными на две стороны диска, располагаются не два слоя тонкого диэлектрика, включенные последовательно, а ряд тонких слоев, покрывающих отдельные крупинки. Это дает значительное снижение тока утечки и повышение сопротивления изоляции до сотен и даже тысяч мегом. Эффективное значение $\epsilon_{эфф}$ при этом снижается, но все же имеет еще достаточно высокие значения, порядка 20 000—40 000. Номинальная емкость на небольших дисках доходит до 0,01—0,02 мкф. Конденсаторы такого типа названы конденсаторами с пограничным слоем (Boundary layer capacitors — BLC).

Новым технологическим приемом, направленным на повышение надежности керамических конденсаторов с большой удельной емкостью при повышенных температурах, является фторирование керамики.

При обработке фторидами сегнетоэлектрической керамики на основе BaTiO₃ ионы фтора замещают часть кислорода в кристаллической системе керамики и снижают число анионных вакансий

до такой степени, что движение ионов сильно затрудняется, возрастает удельное сопротивление материала (рис. 179) и повышается его устойчивость к действию электрического поля при высокой температуре. Для фторирования в туннельную печь, где производится обжиг заготовок конденсаторов, помещают

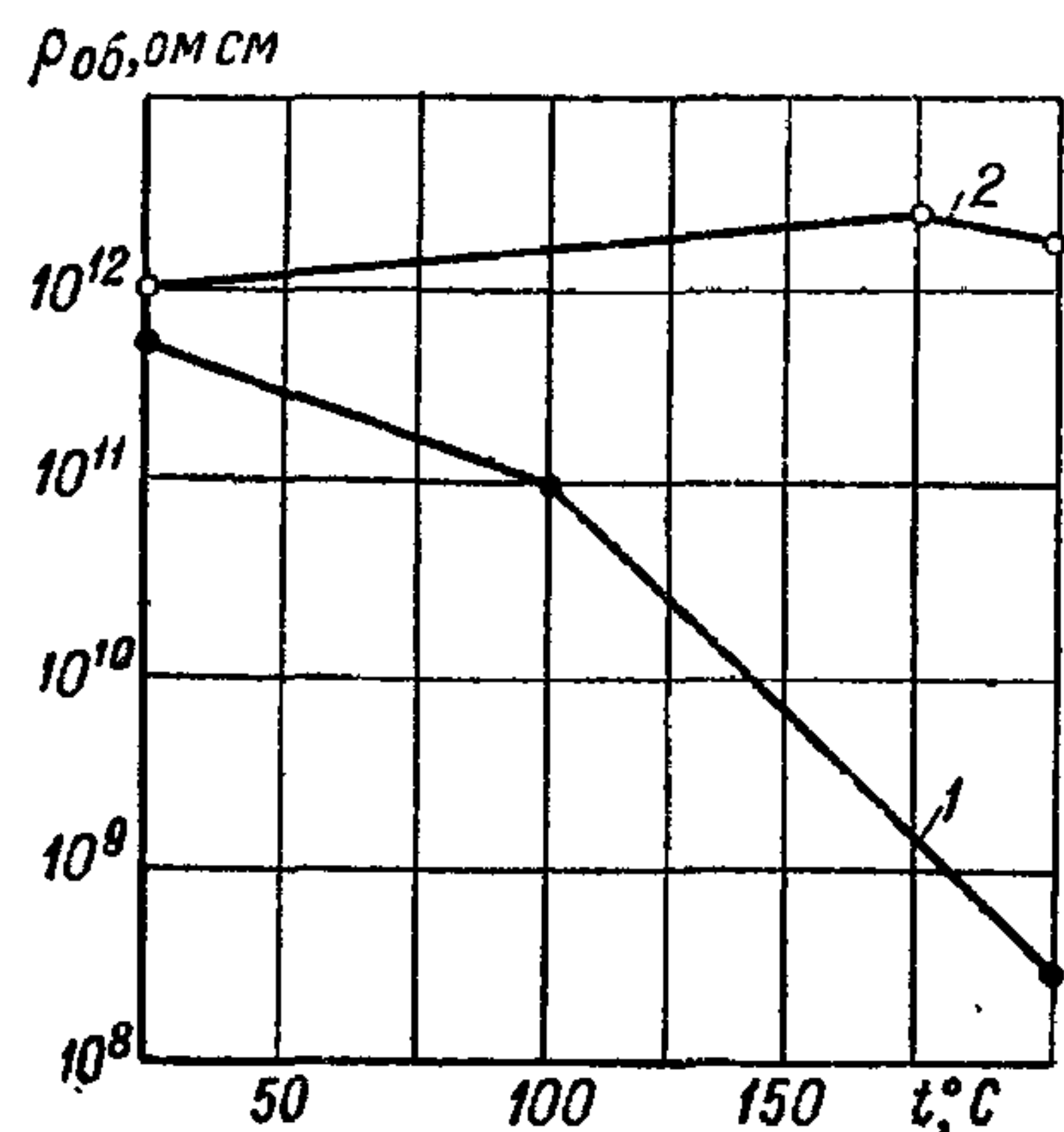


Рис. 179. Зависимость удельного сопротивления от температуры для обычной сегнетокерамики (1) и для фторированной сегнетокерамики (2).

из высокочастотной керамики, а также и низкочастотных конденсаторов из керамических материалов с высокой ϵ . В большинстве индустриально развитых стран количество керамических конденсаторов, используемых в электронной аппаратуре, обычно превышает половину всех применяемых конденсаторов.

В § 68 были перечислены многочисленные керамические материалы, выпуск которых предусмотрен ГОСТ 5458—64; из них наиболее часто применяются следующие:

Обозначение	Изменение емкости, % (— 60 ÷ +20° C)	ТКЕ, град ⁻¹ , × 10 ⁶		Условный цвет
		+20 ÷ +85° C	+85 ÷ +155° C	
П120	+2	+120 ± 30	+110 ± 40	Синий
П33	±0,5	+33 ± 30	+50 ± 40	Серый
М47	—1,5	—47 ± 30	—30 ± 40	Голубой
М75	—2	—75 ± 30	—50 ± 40	Голубой
М700	—12	—700 ± 100	—600 ± 150	Красный (с красной точкой)
М1300	—25	—1300 ± 200	—1000 ± 500	Зеленый
Н70	В пределах —50 ÷ —85°С изменение емкости +30 ÷ —7%.			

таблетки из фторидов, легко отдающих фтор, создавая этим наличие фтора в среде, окружающей обжигаемые детали. По данным Хордквиста (США), конденсаторы из обычной сегнетокерамики при напряжении 500 в и 200° С пробивались через несколько минут, тогда как аналогичные конденсаторы из фторированной керамики в этих же условиях не дали пробоев за 3000 ч.

§ 70. Керамические конденсаторы низкого напряжения

В настоящее время изготавливается множество разнообразных типов низковольтных конденсаторов с малой реактивной мощностью

Буква «П» обозначает положительный знак ТКЕ («плюс»), буква «М» — отрицательный знак ТКЕ («минус») и буква «Н» — низкочастотный материал с большой ϵ и большим $\operatorname{tg} \delta$.

Наиболее широко применяются дисковые КД и, особенно, трубчатые КТ конденсаторы (рис. 180); их номенклатура и технические требования к ним даны в ГОСТ 7159—64. Для большинства материалов номинальное напряжение составляет 160—500 в постоянного тока, для материала Н70—160÷300 в. Для указанной выше гаммы материалов $C_{\text{ном}}$ составляет 3—6800 пф для дисковых и 1—33 000 пф — для трубчатых конденсаторов в зависимости от

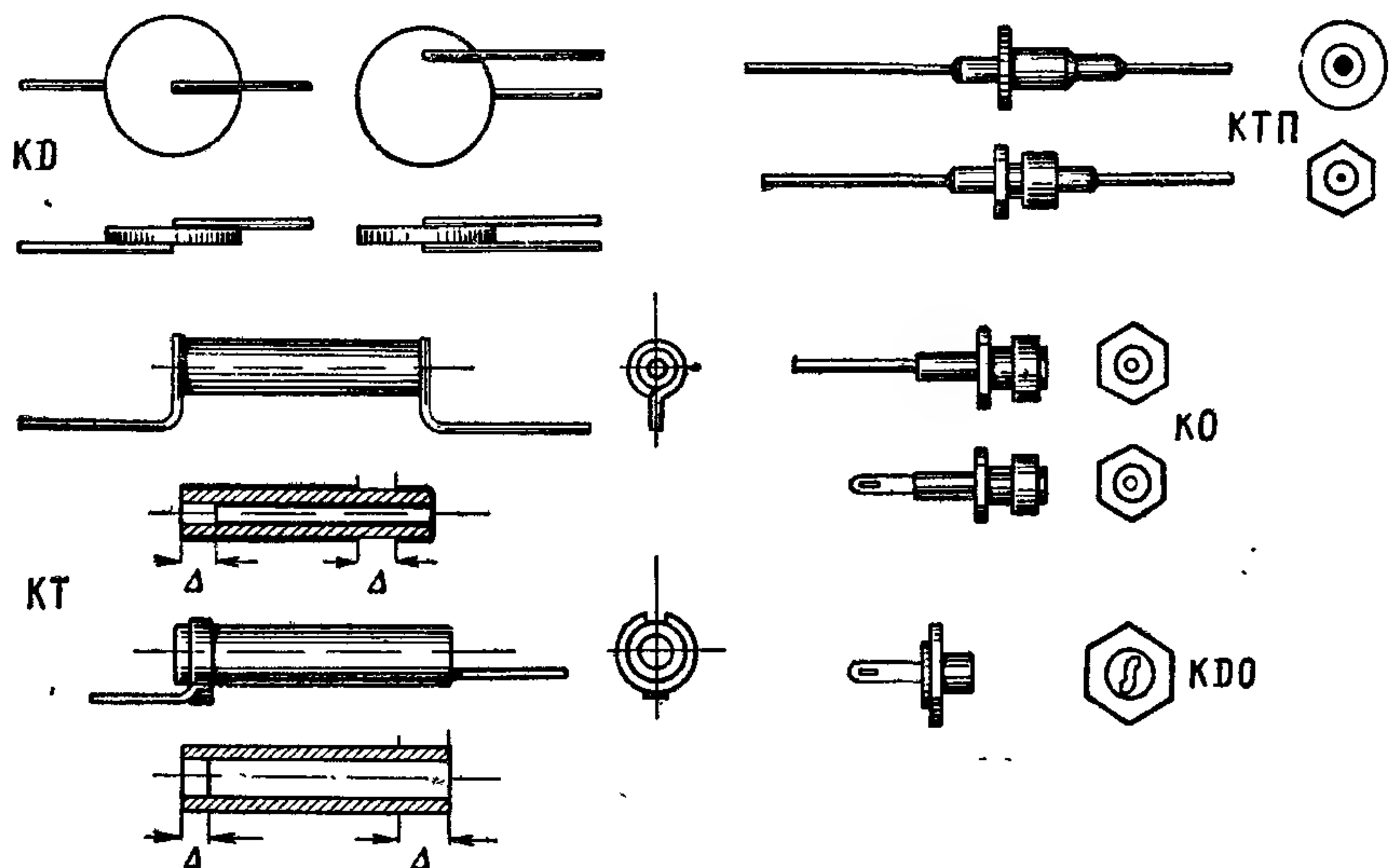


Рис. 180. Керамические конденсаторы низкого напряжения: дисковые — КД; трубчатые — КТ; проходные трубчатые — КТП; опорные трубчатые — КО; опорные дисковые — КДО.

размеров конденсатора и величины ϵ керамики. Диаметр диска составляет 6—16 мм, длина трубки 10—50 мм, допускаемая реактивная мощность в зависимости от размеров — 20—150 вар (кроме конденсаторов из сегнетокерамики). Допускаемое отклонение емкости от номинала: ± 2 , ± 5 , ± 10 и $\pm 20\%$. В течение срока хранения (8, 5 лет) изменение емкости не должно превышать $\pm 2\%$ сверх установленного допуска, а при эксплуатации после хранения (в течение 5000 ч) — не должно превышать $\pm 4\%$. Эти данные соответствуют конденсаторам из высокочастотной керамики, для низкочастотной (Н70) керамики допуск по емкости расширен и изменение емкости после старения и при эксплуатации соответственно составляет -20% и -40% .

Для конденсаторов из высокочастотной керамики допускаемое значение $\operatorname{tg} \delta$ увеличено в сравнении с его значением для самого керамического материала, указанным в § 68, и составляет в зависимости от материала $(12 \div 15) \cdot 10^{-4}$ при нормальной темпера-

туре и $(18-25) \cdot 10^{-4}$ для максимальной температуры категории 1—4 ($+85 \div 300^\circ \text{C}$). Это связано с необходимостью учесть возрастание потерь за счет потерь в обкладках и во влагозащитном покрытии. Для низкочастотных конденсаторов из материала Н70 как при нормальной, так и при повышенной температуре норма на $\text{tg } \delta$ составляет $350 \cdot 10^{-4}$. Сопротивление изоляции после длительного хранения, а также при эксплуатации должно быть не меньше 2000 *Мом* для высокочастотных и не менее 200 *Мом* для низкочастотных конденсаторов. (В исходном состоянии норма — не менее 10^4 *Мом*). Следует иметь в виду, что норма на величину $\text{tg } \delta$ для высокочастотных конденсаторов установлена для частоты 1 *Мгц*, с ростом частоты $\text{tg } \delta$ может заметно возрасти за счет увеличения потерь в обкладках (см. рис. 59); при высоких частотах может также наблюдаться возрастание емкости, обусловленное влиянием индуктивности конденсатора и соединительных проводников (см. рис. 31). В связи с относительно низкой электрической прочностью керамики рабочая напряженность поля в керамических конденсаторах имеет невысокие значения, порядка 0,5—1,5 *кв/мм* (см. рис. 105), при постоянном напряжении; допускаемое напряжение высокой частоты определяется по величине допускаемой реактивной мощности.

Для длительной работы в условиях высокой влажности без заметного ухудшения электрических характеристик были разработаны герметизированные трубчатые керамические конденсаторы типа КГК, на которые имеется ГОСТ 7158—54. В конденсаторах КТ изменение емкости и $\text{tg } \delta$ может быть вызвано адсорбцией влаги на закраине конденсатора Δ , которая обычно не превышает 1—1,5 *мм* (если влага проникнет через влагозащитное покрытие) (§ 42). В конденсаторах КГК трубчатый конденсатор помещен в защитную керамическую трубку, поверхность которой также может адсорбировать влагу, но в данном случае путь утечки будет увеличен и определяется уже не закраиной Δ , а всей длиной защитной трубки; это заметно ослабляет влияние адсорбированной влаги на электрические свойства конденсатора (рис. 117, з). Конденсаторы КГК изготавливаются только из высокочастотной керамики и имеют номинальную емкость от 5 до 1000 *пф*, номинальное напряжение 500 *в* постоянного тока или 250 *в* высокой частоты (эффективное значение). Норма на сопротивление изоляции не менее 10^4 *Мом* в нормальных условиях и не менее 10^3 *Мом* после выдержки в условиях высокой влажности 24 ч.

Относительно широкое применение в электронной аппаратуре имеют проходные и опорные керамические конденсаторы (см. рис. 180), качество которых оговаривается ГОСТ 41 553—65. Они изготавливаются из таких же типов керамических масс, как и конденсаторы КТ или КД. Номинальное рабочее напряжение 750 *в* постоянного тока. Для проходных конденсаторов (§ 17) трубчатого типа КТП номинальная емкость

составляет от 8,2 нф до 0,01 мкф , а ток через стержень (шинку) в зависимости от размеров лежит в пределах 1—15 а ; для опорных трубчатых конденсаторов КО величина $C_{\text{ном}} = 8,2 \div 4700 \text{ нф}$, а для опорных дисковых КП составляет 3,3—2200 нф . Для высокочастотных конденсаторов $\text{tg } \delta \leq 15 \cdot 10^{-4}$ и допуск по емкости ± 10 и $\pm 20\%$; для низкочастотных $\text{tg } \delta \leq 350 \cdot 10^{-4}$ и допуск $-20 \div +50\%$ и $-20 \div +80\%$. Зависимость емкости таких конденсаторов от температуры при различных типах керамических масс показана на рис. 181.

Кроме керамических конденсаторов, предусмотренных в указанных выше ГОСТ, выпускается большое количество нестандартизованных типов керамических конденсаторов, качество которых оговаривается в соответствующих технических условиях. Среди них можно упомянуть высокочастотные пластинчатые конденсаторы типа К10-7 с размерами от 4×4 до $12 \times 12 \text{ мм}$ (толщина 5—5,5 мм) на напряжения 25, 160 и 250 в , с емкостями от 2,2 до 1000 нф , (оукленные) и с размерами от 6×7 до $14 \times 15 \text{ мм}$, на напряжения 50, 250 и 500 в , с емкостями от 6,8 до 1000 нф (опрессованные пластмассой). Для этих конденсаторов гарантируется $\text{tg } \delta \leq 12 \cdot 10^{-4}$. Использование сегнетокерамики (массы Н30 с $\epsilon = 1400$; Н70 с $\epsilon = 3000$ и Н90 с $\epsilon = 4000$) позволило наладить выпуск пластинчатых конденсаторов типа КПМ с размерами от 3×4 до $10 \times 13 \text{ мм}$ и с пределами емкости от 220 нф до 0,1 мкф при напряжении 50 в ; для таких конденсаторов $\text{tg } \delta \leq 350 \cdot 10^{-4}$.

Особо повышенной удельной емкостью обладают монолитные конденсаторы типа КМ-6, которые при размерах от 5×5 до $12 \times 12 \text{ мм}$ и при напряжениях 25—50 в в зависимости от типа керамики и размеров могут иметь емкость от 120 нф до 1—2,2 мкф ($\epsilon_{\text{уд}} = 1,4 \div 1,9 \text{ мкф/см}^3$ при напряжении 25 в).

Высокой рабочей температурой обладают фольгово-керамические конденсаторы, изготавливаемые с тремя типонаминалами: первый — $13 \times 11 \times 5 \text{ мм}$ с номинальной емкостью

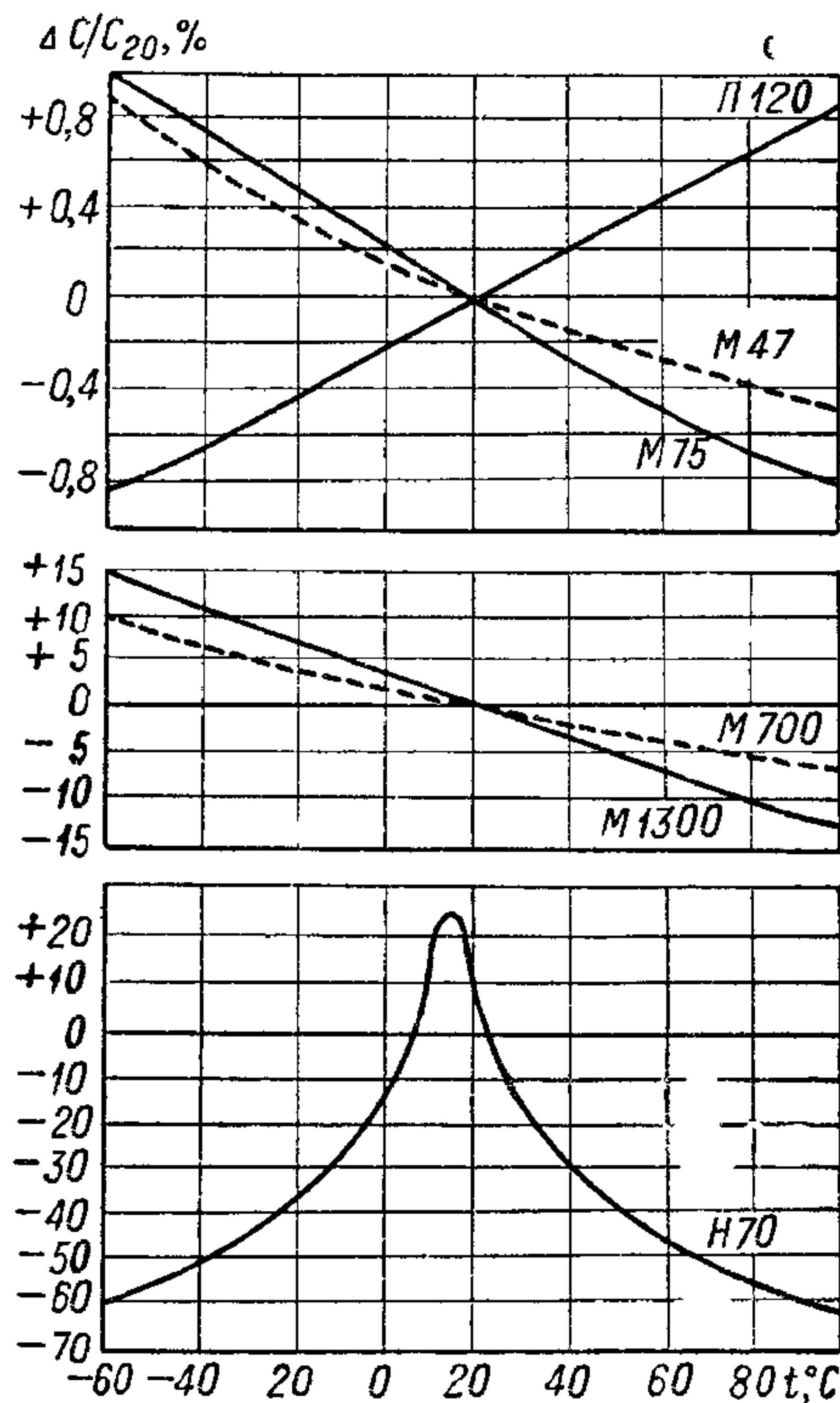


Рис. 181. Зависимость емкости керамических конденсаторов от температуры; возле кривых указан тип массы.

от 15 до 510 пф, второй — $22 \times 16 \times 7$ мм с $C_{\text{ном}} = 560 \div 2200$ пф и третий — $24 \times 18 \times 11$ мм с $C_{\text{ном}} = 2400 \div 10\,000$ пф. Величина ТКЕ гарантируется в пределах $\pm 100 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Значения допускаемых напряжений постоянного тока и нормы на величину $\text{tg } \delta$ и $R_{\text{из}}$ указаны ниже:

Темпе- ратура, °С	Допускаемое напряжение, в для типоминалов			$\text{tg } \delta \times 10^4$, не выше	$R_{\text{из}}$, Мом, не ниже
	первого	второго	третьего		
20	100	50	25	15	10 000
155	100	50	25	30	100
300	50	25	25	100	1—10

Допуск по емкости: ± 5 , ± 10 и $\pm 20\%$, гарантированный срок службы — 5000 ч при 155° С и 500 ч при 300° С.

Таблица 18

Некоторые характеристики конденсаторов с барьерным слоем

Диаметр, мм	Вес, г	$C_{\text{ном}}$, мкф при $U_{\text{ном}}$			$\text{tg } \delta$, %, не выше, (1 кГц) при $U_{\text{ном}}$			$R_{\text{из}}$, ком, не ниже, $U_{\text{ном}}$		
		3 в	10 в	25 в	3 в	10 в	25 в	3 в	10 в	25 в
6	0,5	0,1	0,022	—	5	7	—	7,5	10^3	—
10	0,7	0,47	0,1	0,047	5	7	7	2,0	500	10^3
14	1,5	1,0	0,22	0,1	5	7	7	1,5	250	10^3
18	2,5	2,2	0,47	0,2	5	7	7	1,0	100	10^3

При малых значениях напряжения большие значения $C_{\text{ном}}$ можно получать для керамических конденсаторов с барьерным слоем.

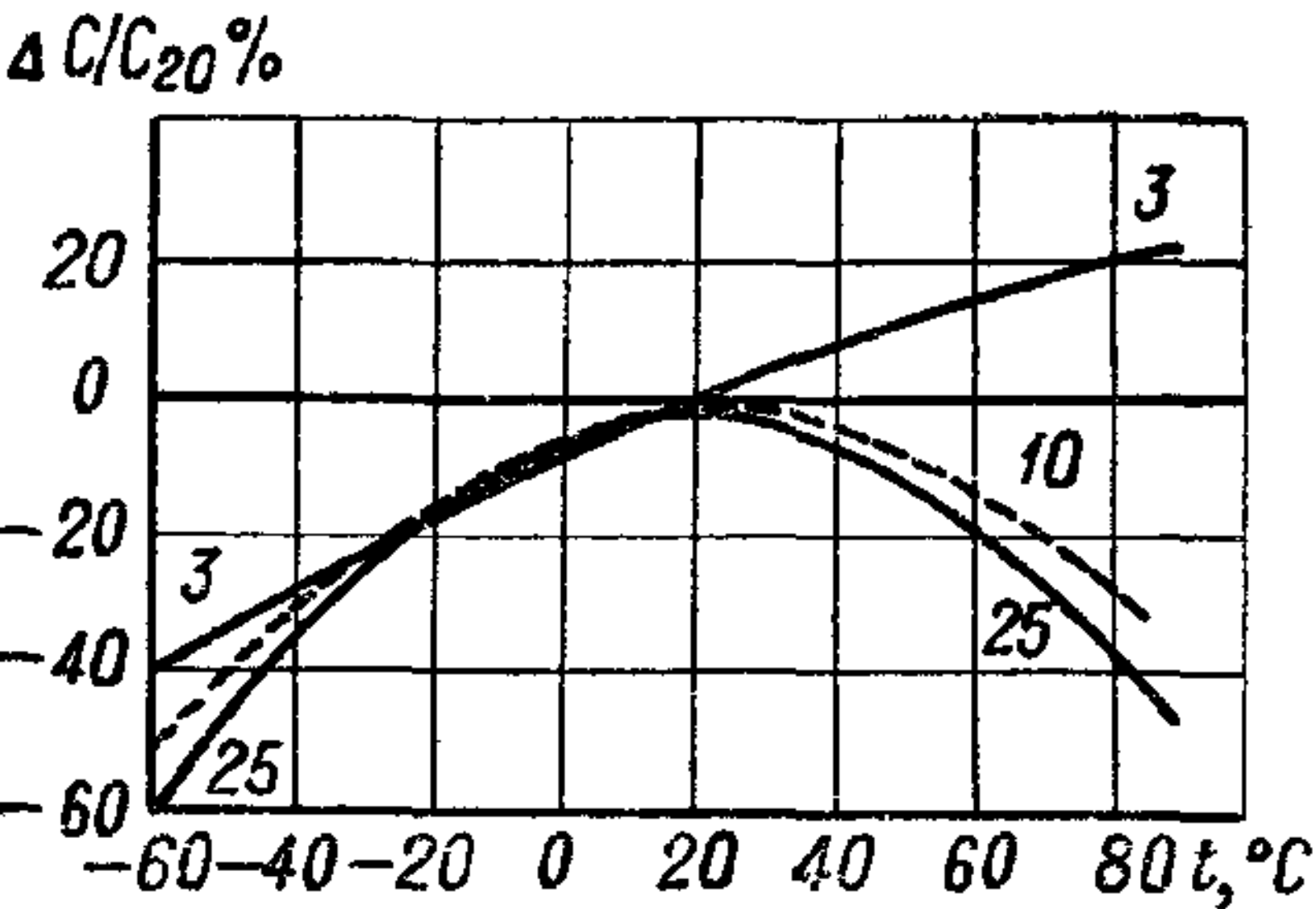


Рис. 182. Зависимость емкости конденсаторов с барьерным слоем от температуры; у кривых указано номинальное напряжение в вольтах.

Некоторые характеристики таких конденсаторов типа К10У-5 приведены в табл. 18, а зависимость их емкости от температуры при трех значениях $U_{\text{ном}}$ показана на рис. 182.

Рабочее напряжение переменного тока составляет 70% от $U_{\text{ном}}$. Конденсаторы могут включаться в цепь без соблюдения полярности, но при повторном подключении после длительной эксплуатации при постоянном напряжении следует

соблюдать первичную полярность. Высокое значение угла потерь: $\text{tg } \delta \approx 500 \div 700 \cdot 10^{-4}$ обусловлено большим последователь-

но включенным сопротивлением слоя полупроводящей керамики ($\rho_{об} \approx 10 \div 100 \text{ ом} \cdot \text{см}$). Пределы рабочей температуры: $-60 \div +85^\circ \text{C}$.

Йокш предложил для конденсаторов с барьерным (запорным) слоем эквивалентную схему, показанную на рис. 183. Анализ этой схемы позволил ему получить следующее выражение для емкости этого слоя:

$$C [нф] = \frac{2,1 \cdot 10^5 \sqrt{\epsilon} F}{\sqrt{\rho} \sqrt{\mu} \sqrt{U_D + U_{зап}}} \quad (259)$$

Здесь ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость материала полупроводниковой керамики, F — поверхность электродов в см^2 , ρ — удельное сопротивление полупроводника в $\text{ом} \cdot \text{см}$, μ — подвижность электронов в $\text{см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$, U_D — диффузионное напряжение в в, определяющее потенциальный барьер на p - n -переходе (металл — полупроводник), $U_{зап}$ — напряжение, приложенное в запиорном направлении в в.

Это выражение показывает, что C увеличивается с уменьшением сопротивления полупроводящей керамики и уменьшается при увеличении запиорного напряжения. При постоянном напряжении, приложенном к конденсатору, оно делится между двумя слоями в соответствии с сопротивлением диодов D , а потому оказывается приложенным в основном к одному из слоев; переменное напряжение разделяется между слоями в соответствии с их емкостями C , т. е. примерно поровну. Зависимость емкости и $\text{tg } \delta$ от постоянного и переменного напряжения, приложенного к конденсатору небольшой емкости ($0,03 \text{ мкф}$), по данным Йокша, показана на рис. 183, в нижней части.

Как уже отмечалось выше, в конденсаторах с пограничным слоем (BL — capacitors), по японским данным, можно получить значительное улучшение сопротивления

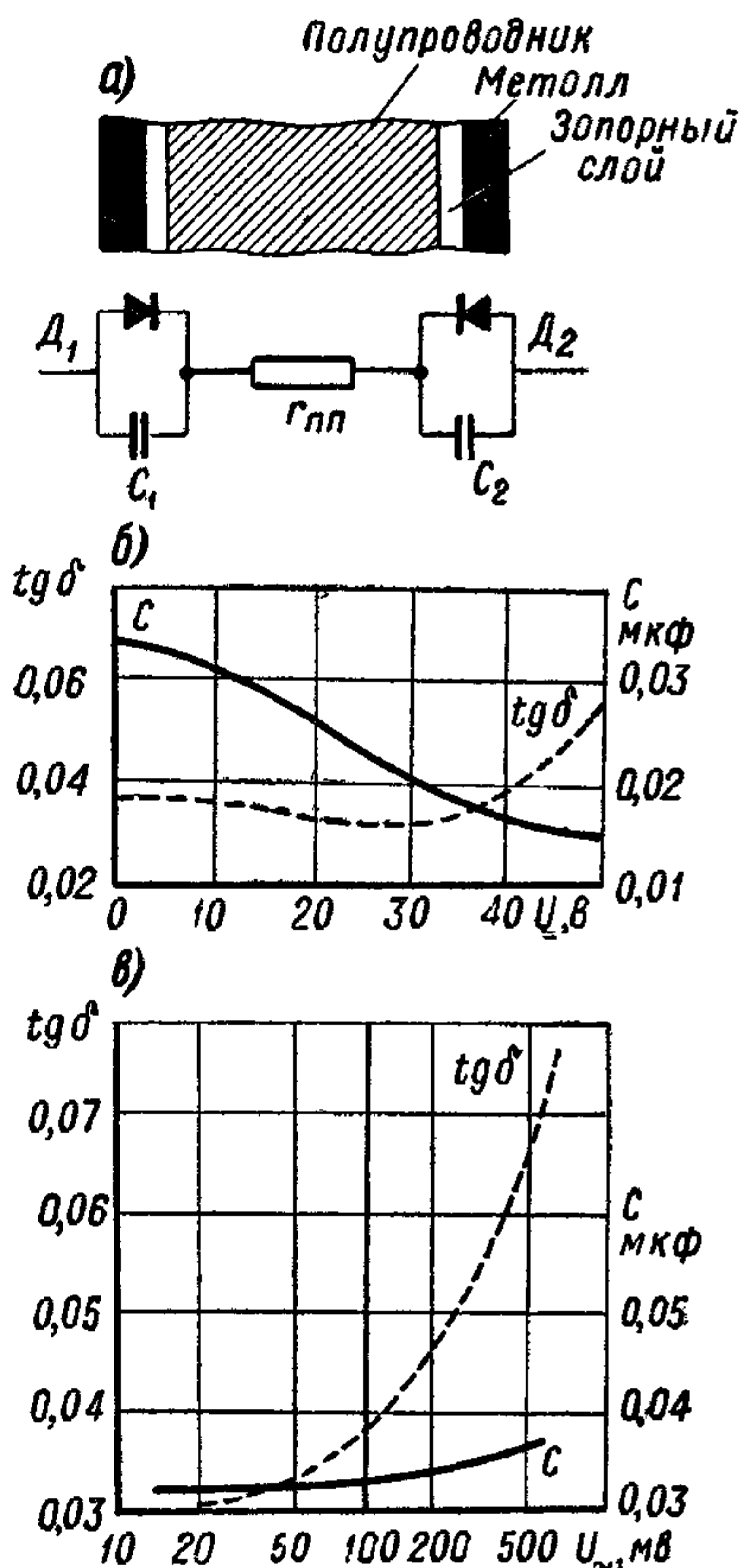


Рис. 183. Конденсатор с барьерным слоем: а — эквивалентная схема; б — зависимость емкости и угла потерь от постоянного напряжения; в — зависимость емкости и угла потерь от переменного напряжения ($f = 1 \text{ кГц}$).

изоляции при снижении эффективного значения диэлектрической проницаемости. Для материала на основе BaTiO_3 с неболь-

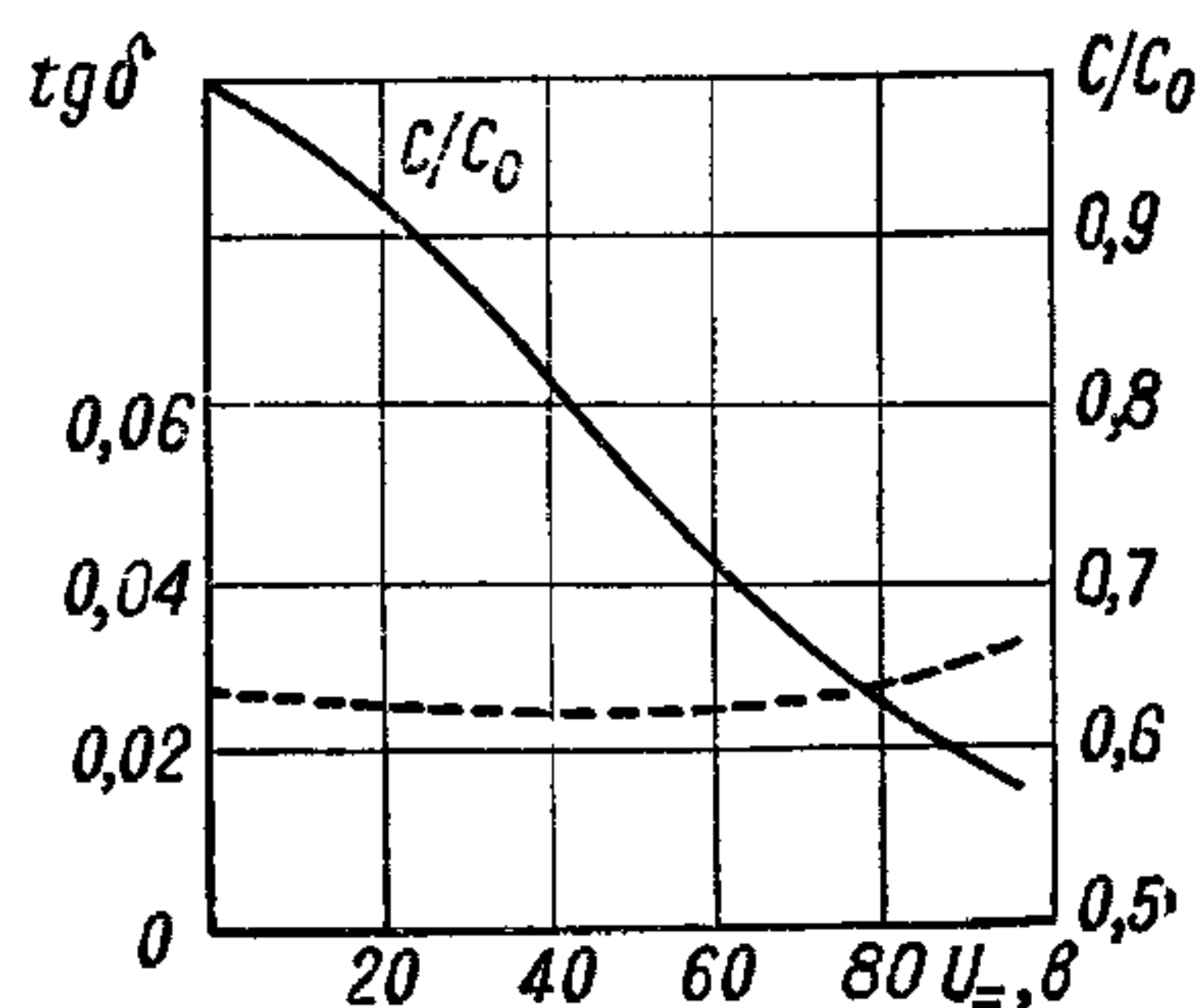


Рис. 184. Зависимость емкости и угла потерь конденсатора с пограничным слоем от постоянного напряжения.

шими специальными добавками (порядка 2%) можно получать при $\epsilon_{\text{эф}} \approx 20\,000 \div 40\,000$ и $\text{tg } \delta \approx 0,03 \div 0,10$ величину удельного сопротивления $\rho_{\text{об}} \approx 10^{11} \div 10^{12} \text{ ом} \cdot \text{см}$. На диске диаметром 10 и толщиной 0,65 мм величина $C_{\text{ном}} = 0,02 \text{ мкф}$, $U_{\text{пр}} = 600 \text{ в}$ при вероятности пробоя 5% и 1650 в — при вероятности 99%. Заметное снижение емкости с частотой и резкое возрастание $\text{tg } \delta$ наблюдается при частотах порядка 5—10 Мгц. Зависимость емкости и угла потерь от заporного напряжения показана на рис. 184.

§ 71. Керамические конденсаторы высокого напряжения

Наряду с конденсаторами низкого напряжения в современной электронной аппаратуре находят широкое применение и керамические конденсаторы высокого напряжения. Основные конструк-

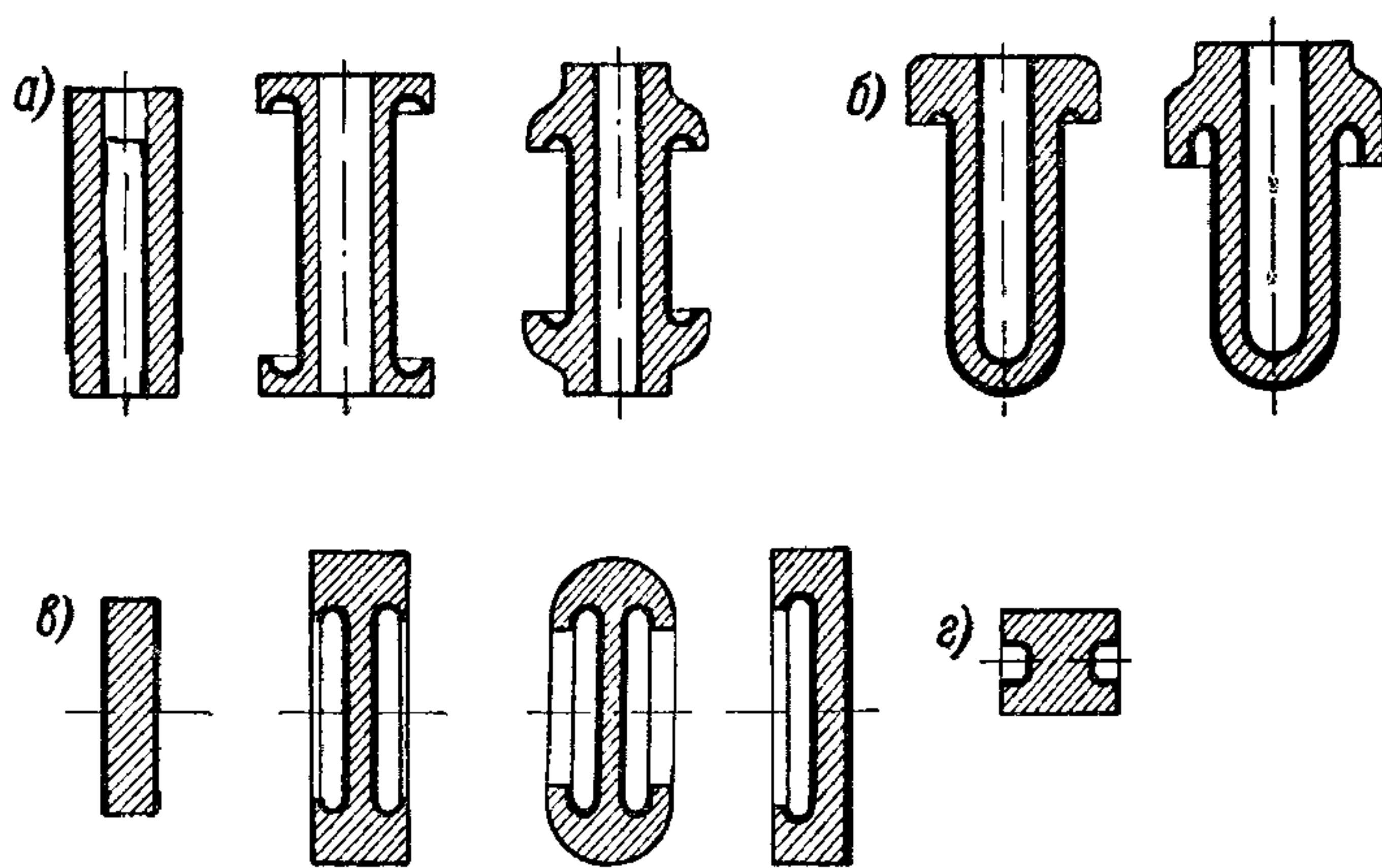


Рис. 185. Основные конструктивные формы керамических конденсаторов высокого напряжения: а — цилиндрическая (трубка); б — горшковая; в — плоская (дисковая); г — боченочная.

тивные формы этих конденсаторов (рис. 185) получены на основе приспособления к условиям работы на высоком напряжении простейших исходных конструкций: диска и трубки. Большим преимуществом керамики в сравнении со слюдой является возможность выравнивания поля у краев обкладок

за счет плавного изменения толщины диэлектрика (см. рис. 78 и 114), что позволяет резко поднять напряжение начала короны и довести его до значения разрядного напряжения (см. табл. 6); последнее также может быть резко повышено при помощи создания выступов на закраине или специальных «юбок», увеличивающих путь разряда. В связи с этим имеется возможность изготовлять, без их секционирования, керамические конденсаторы с рабочим напряжением до 30 кВ при постоянном токе и до 25 кВ при высокой частоте (эффективное значение). Испытательное напряжение (10 сек) при постоянном напряжении равно $1,5 U_{\text{ном}}$ постоянного тока и при высокой частоте $1,25 U_{\text{ном. в. ч}}$ при напряжениях 20 кВ (и ниже) и $1,12 U_{\text{ном. в. ч}}$ при номинальном напряжении 25 кВ в. ч.

Согласно ГОСТ 7160—63 на конденсаторы керамические высоковольтные К15У-1 (плоские), К15У-2 (трубчатые) и К15У-3 (горшковые) они изготавливаются из 7 типов высокочастотных керамических масс (от П120 до М1300) и рассчитаны на эксплуатацию при температуре окружающего воздуха от -60 до $+155^{\circ}\text{C}$ (до $+100^{\circ}\text{C}$ для керамики М750), при относительной влажности не более 98% при $+40^{\circ}\text{C}$ и при давлении окружающего воздуха не ниже 5 мм рт. ст.

Предельное эффективное значение тока для конденсаторов данного типа рассчитывается по формуле

$$I_{\text{доп}} = \frac{K}{\sqrt{f}}[a],$$

где f — частота в Мгц, а коэффициент K зависит от конструкции. Для конденсаторов с ленточными выводами с шириной в минимальной части, равной B [мм], $K = 3,4 B$; для конденсаторов с резьбовыми выводами с диаметром резьбы d [мм] $K = 7 d$.

Конденсаторы изготавливаются с широким диапазоном номинальных напряжений, емкостей и номинальной реактивной мощности:

Тип	Номинальное напряжение, кВ		$C_{\text{ном}}$, пф	Номинальная мощность, кВАр
	постоянный ток	высокая частота		
К15У-1	4—20	3—14	1—10 000	4—225
К15У-2	4—30	2—25	33—15 000	2—400
К15У-3	4—8	3—6	22—3 300	10—30

Обычное допускаемое отклонение емкости от номинала $\pm 20\%$, хотя для отдельных вариантов применяется также допуск $\pm 10\%$; изменения емкости с температурой определяются типом керамики в соответствии с величиной ТКЕ (см. рис. 181). Значения номинальной реактивной мощности установлены для температуры окружающей среды равной $+85^{\circ}\text{C}$ (для керамики М750 $+60^{\circ}\text{C}$);

при изменении температуры окружающего воздуха допускаемое значение P_R изменяется в соответствии с кривыми на рис. 186.

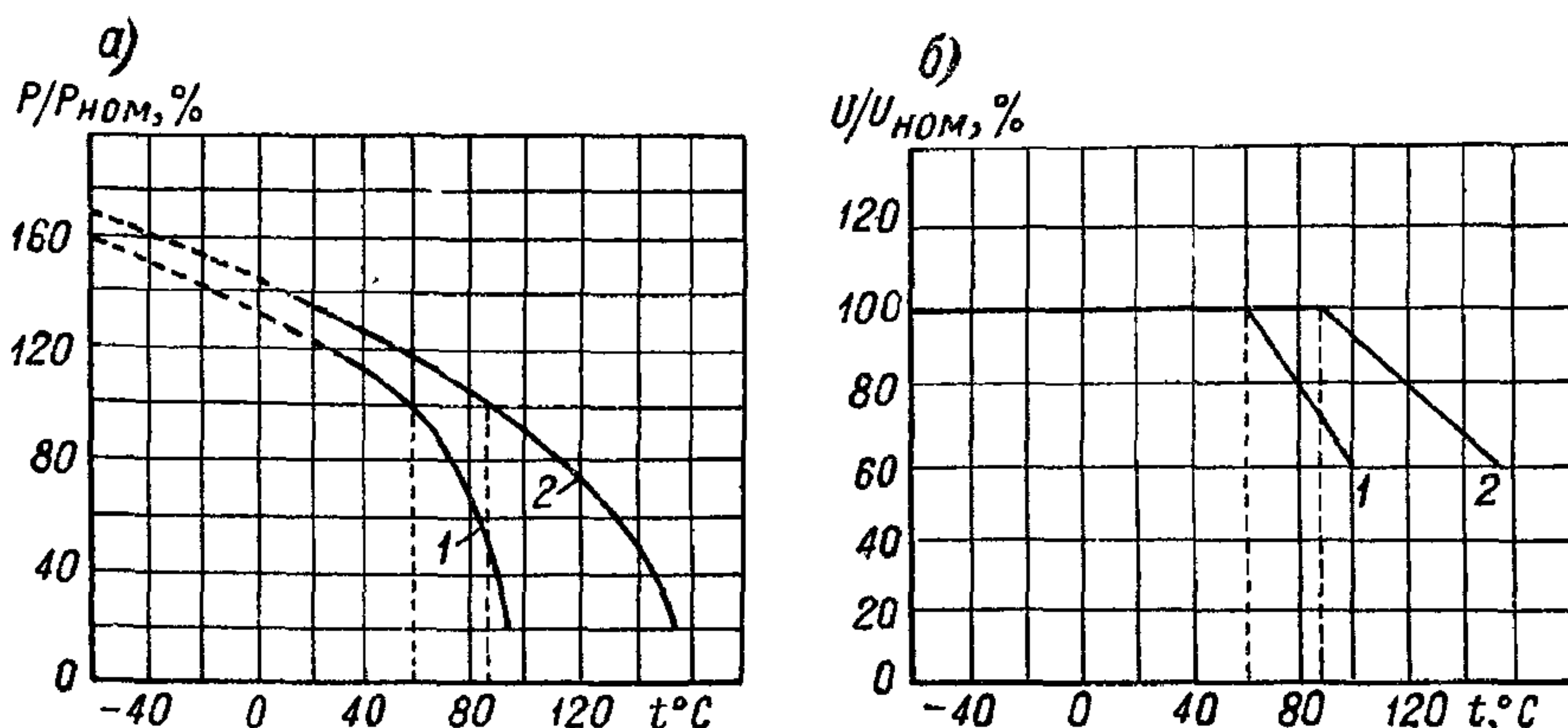


Рис. 186. Зависимость допускаемой реактивной мощности (а) и допускаемого напряжения (б) керамических высоковольтных конденсаторов от температуры окружающей среды.

1 — группа М750; 2 — прочие группы керамики.

Номинальное напряжение также соответствует температуре t_0 не выше $85^\circ C$ (для МГ50 — не выше $60^\circ C$) и при более высоких

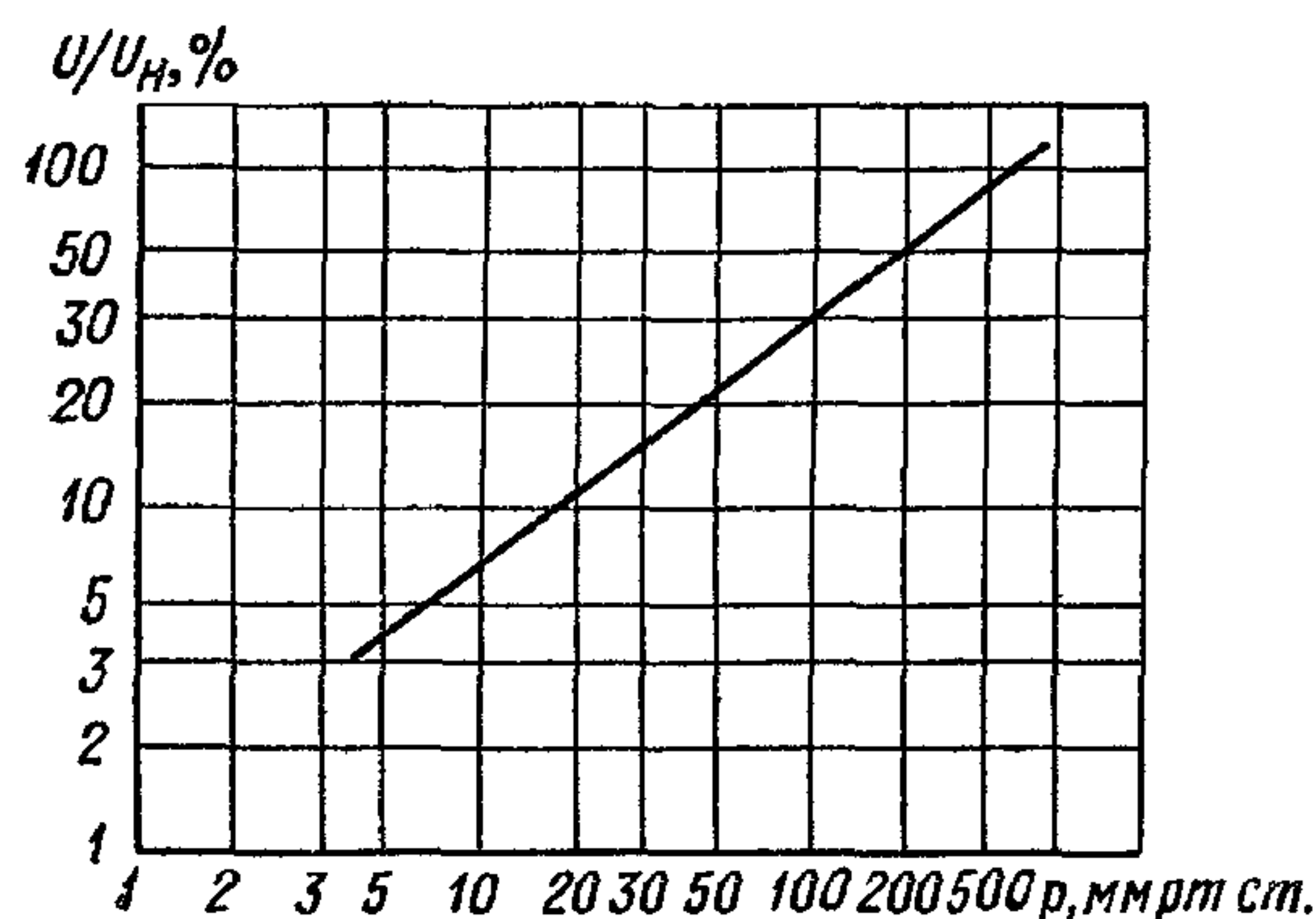


Рис. 187. Зависимость допускаемого рабочего напряжения для керамических высоковольтных конденсаторов от давления воздуха.

температурах снижается (рис. 186). При снижении давления окружающего воздуха также требуется снижать допускаемое рабочее напряжение как при высокой частоте, так и при постоянном токе (рис. 187).

Следует иметь в виду, что номинальное рабочее напряжение при высокой частоте представляет собой верхний предел, который не должен быть превышен в условиях эксплуатации. Практически величина высокочастотного рабочего напряжения при заданном

значении допускаемой реактивной мощности и заданной частоте может быть найдена по формуле

$$U = \sqrt{\frac{P_R}{2\pi f C \cdot 10^{-12}}} = \frac{10^6}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{P_R}{f \cdot C}}.$$

Здесь P_R — в вар, C — в пф, f — в гц и U — в в (эффективное значение).

Кроме того, величина напряжения высокой частоты не должна превышать значения, определяемого допускаемой величиной тока $I_{\text{доп}}$:

$$U = \frac{I_{\text{доп}}}{2\pi f C \cdot 10^{-12}},$$

где $I_{\text{доп}}$ — в а, f — в гц; C — в пф и U — в в.

Допускается работа конденсаторов в импульсных режимах, причем напряжение радиоимпульса не должно превышать амплитудного значения допускаемого рабочего напряжения высокой частоты, а напряжение видеоимпульса — допускаемого напряжения постоянного тока. При этом надо иметь в виду, что максимальное значение импульсного напряжения не должно превышать величины, определяемой допустимой реактивной мощностью конденсатора.

При работе конденсатора в цепи постоянного тока температура конденсатора практически равна температуре окружающей среды. При этом мы можем находить соответствующие изменения емкости по кривым на рис. 181. При работе конденсатора в цепях тока высокой частоты температура его будет выше температуры окружающей среды за счет перегрева, обусловленного потерями в конденсаторе. Очевидно, что в этом случае изменение емкости будет обусловлено не только изменением t_0 , но фактической температурой конденсатора.

Диаметр плоских (дисковых) конденсаторов К15У-1 (рис. 188) лежит в пределах от 18 до 180 мм и вес составляет от 20 г до 1,8 кг; для трубчатых конденсаторов К15У-2 диаметр составляет от 20 до 132 мм, длина — от 30 до 212 мм и вес — от 30 г до 6,5 кг; для горшковых конденсаторов К15У-3 диаметр составляет от 31,5 до 53 мм, длина — от 47,5 до 75 мм и вес — от 150 до 400 г. При максимальных значениях P_R удельная реактивная мощность составляет: для плоских конденсаторов 680 вар/см³, для трубчатых 138 вар/см³ и для горшковых 152 вар/см³; соответственно мощность, приходящаяся на единицу веса, равна 225, 89 и 108 вар/г.

Тангенс угла потерь конденсаторов при температуре $+15 \div +35^\circ \text{C}$, относительной влажности не более 80% и частоте 0,3—1,5 Мгц не должен превышать $10 \cdot 10^{-4}$ для групп П120, П60 и М47 и $15 \cdot 10^{-4}$ для групп М75, М150, М750 и М1300. Сопротивление изоляции должно быть не ниже 10 000 Мом. При максимальной рабочей температуре величина $\text{tg } \delta$ не должна превышать соответственно $15 \cdot 10^{-4}$ и $20 \cdot 10^{-4}$, а после пребывания в течение 96 ч при влажности 95—98% и температуре 38—42° С — соответственно $20 \cdot 10^{-4}$ и $25 \cdot 10^{-4}$; сопротивление изоляции при максимальной рабочей температуре, а также после воздействия влажности не должно падать ниже 1000 Мом.

Применение принудительного охлаждения снижает перегрев конденсатора и позволяет повысить его реактивную мощность;

условия работы конденсаторов при принудительном охлаждении в каждом отдельном случае должны быть согласованы с предприятием, изготавливающим керамические конденсаторы данного типа.

По данным Н. П. Богородицкого и И. Д. Фридберга, при естественном воздушном охлаждении толщину стенки в керамическом высокочастотном высоковольтном конденсаторе следует определять

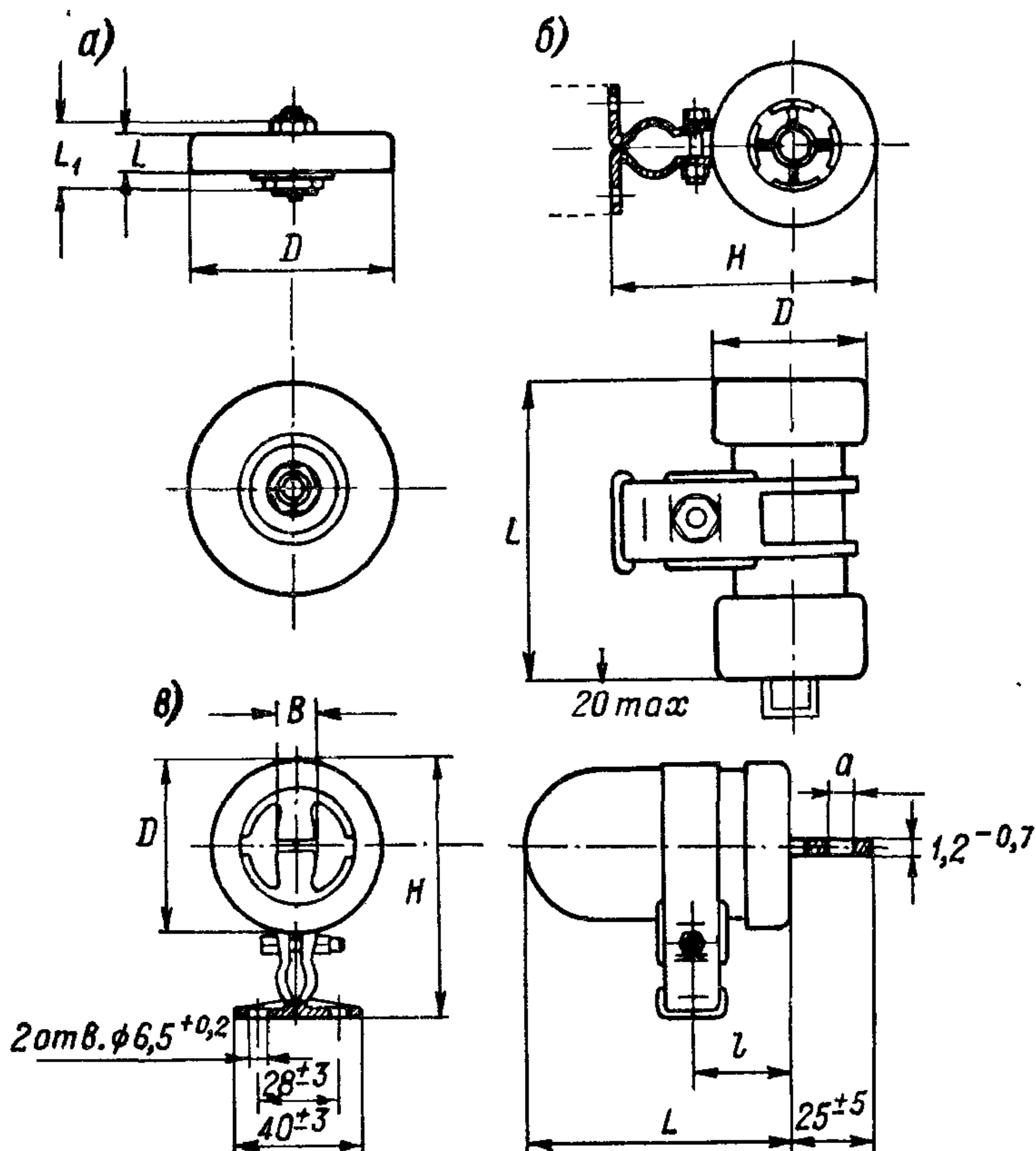


Рис. 188. Керамические конденсаторы высокого напряжения: плоский (а), трубчатый (б) и горшковый (в).

не из соображений об электрической прочности, а из соображений о допуске перегреве конденсатора под нагрузкой. Приравняв тепловыделение и теплоотдачу при установившемся режиме [формула (87), § 24], легко получить выражение для толщины стенки (толщины диэлектрика):

$$d = 1,11 \cdot 10^{-12} k U^2 f \varepsilon \operatorname{tg} \delta. \quad (260)$$

Здесь U — эффективное значение напряжения высокой частоты в в, f — частота в гц, ε и $\operatorname{tg} \delta$ — характеристики используемой керамики.

Коэффициент k зависит от допускаемого перегрева и условий теплоотдачи:

$$k = \frac{1}{2k'\alpha_T\Delta t}, \quad (261)$$

где Δt — допускаемый перегрев в $^{\circ}\text{C}$ (обычно порядка 50°C при номинальной мощности), α_T — коэффициент теплоотдачи в $\text{вт}/\text{см}^2 \cdot \text{град}$, k' — коэффициент конфигурации, показывающий отношение поверхности охлаждения к поверхности обкладки. У плоских (дисковых) конденсаторов тепло отводится с обеих обкладок и $k' = 2$; у трубчатых конденсаторов с внутренней обкладки тепло отводится хуже, чем с наружной, и $k' = 1,5$; у горшковых тепло отводится только с наружной обкладки, так как через конденсатор нет сквозного тока воздуха, как через трубку, и $k' = 1$; для бочонка играет роль и относительно развитая боковая поверхность, также отводящая тепло, а потому для него $k' = 4 \div 5$.

Хотя в ГОСТ 7160—63 бочоночные конденсаторы не предусмотрены, они все же находят себе применение в тех случаях, когда требуется высоковольтный конденсатор малой емкости и относительно небольших размеров. В частности, для изготовления таких конденсаторов, рассчитанных на работу при постоянном токе, применяют и сегнетокерамические массы с высокой ϵ для получения повышенной емкости. В этих случаях для повышения разрядного напряжения и влагозащиты бочоночный конденсатор часто опрессовывают термопластичной пластмассой.

Формула (260) показывает, что толщина стенки d возрастает с увеличением ϵ ; поэтому при высоких значениях U и f для того, чтобы толщина диэлектрика не получалась чрезмерной, выгоднее применять установочную керамику типа П120; при более низких частотах лучшие результаты дает высокочастотная конденсаторная керамика с высокой ϵ . Толщину диэлектрика, полученную расчетом по формуле (260), надо проверить на электрическую прочность с учетом указанных выше допустимых значений рабочей напряженности поля (см. рис. 61). При высоких значениях частоты надо учитывать частотную зависимость $\text{tg } \delta$ и подставлять в формулу (260) значение $\text{tg } \delta$, соответствующее рабочей частоте.

Принудительное охлаждение позволяет увеличить α_T и, следовательно, уменьшить коэффициент k и толщину диэлектрика d , что при заданном значении U дает повышение $E_{\text{раб}}$. Если сохранить прежней толщину стенки, то, применив принудительное охлаждение, можно увеличить напряжение U и допускаемую реактивную мощность, но также при соответственном увеличении $E_{\text{раб}}$. При этом надо учитывать, что прочность керамики невелика, а потому возможности повышения $E_{\text{раб}}$ ограничены. Это сужает перспективы резкого повышения удельной реактивной мощности керамических конденсаторов, например, за счет интенсивного водяного охлаждения, хотя отдельные попытки в этом направлении и предпринимаются.

В. СТЕКЛЯННЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

§ 72. Стекло как конденсаторный диэлектрик

Известно, что стекло явилось первым диэлектриком, использованным для изготовления конденсаторов (§ 2). Некоторое время стеклянные конденсаторы как в виде «лейденских банок», т. е. цилиндрического типа, так и из листового стекла (плоского типа) монополюльно применялись в качестве основного типа конденсатора и при высоких, и при низких частотах, но затем вышли из употребления, уступив свое место в области низких частот бумажным конденсаторам, а в области высоких частот — слюдяным. Это было обусловлено рядом недостатков, присущих стеклу как конденсаторному диэлектрику.

Основой обычного стекла является к в а р ц (окись кремния SiO_2), который встречается в природе в виде кристаллов горного хрусталя или в виде кварцевого песка. Непрозрачный плавленый кварц, получаемый сплавлением песка, обладает неудовлетворительными электрическими свойствами, но, используя для сплавления мелкие кристаллы чистого кварца, удается получать п р о з р а ч н ы й п л а в л е н ы й к в а р ц (кварцевое стекло), представляющее собой первоклассный высокочастотный диэлектрик.

Плавленый кварц характеризуется следующими свойствами:

Плотность	2,1—2,2 г/см ³
Температура линейного расширения	1720° С
Коэффициент линейного расширения	$0,5 \cdot 10^{-6}$ град ⁻¹
Временное сопротивление сжатию	выше 10 000 кг/см ²
Временное сопротивление разрыву и изгибу	600—700 кг/см ²
Диэлектрическая проницаемость	4,2
Температурный коэффициент	$+(20-40) \cdot 10^{-6}$ град ⁻¹
Тангенс угла потерь	менее $3 \cdot 10^{-4}$
Удельное объемное сопротивление	$10^{17} - 10^{18}$ ом · см
Пробивная напряженность	10—40 кВ/мм

Проводились попытки использовать этот диэлектрик для изготовления высокочастотных конденсаторов. Однако трубочки из чистого плавленого кварца, лишенного пузырьков воздуха, дороги, так как технология их получения, требующая работы при высоком вакууме и температуре порядка 2000° С, достаточно сложна. В связи с этим плавленый кварц используется в конденсаторостроении только для небольших деталей, применяемых в качестве твердого диэлектрика в высококачественных воздушных конденсаторах, где ценен как малый угол потерь кварца и стабильность ϵ , так и весьма малый α_d . В последнее время начаты попытки использовать окись кремния SiO_2 при изготовлении тонкослойных конденсаторов (§ 74).

Сплавляя кварцевый песок с окислами ряда металлов, можно получить с и л и к а т н о е с т е к л о — прозрачный материал, обладающий большими технологическими преимуществами по

сравнению с чистым плавленым кварцем. Это стекло представляет собой дешевый материал с пониженной температурой размягчения, позволяющей получать из него в условиях массового производства как листы, так и изделия разнообразной формы, преимущественно трубки и тела вращения. Среди большого количества разнообразных сортов стекла, применяемых современной практикой, отличается своей дешевизной и технологическими преимуществами б о р о с и л и к а т н о е щ е л о ч н о е с т е к л о. Его средний состав: 70—80% SiO_2 , 12—16% B_2O_3 и 5—15% Na_2O или K_2O . У такого стекла $\varepsilon = 5 \div 7,5$; $\text{TK}\varepsilon = + (300 \div 500) \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; $\text{tg } \delta = (20 \div 60) \cdot 10^{-4}$ (при 1 Мгц); $\rho_{\text{об}} = 10^{12} \div 10^{13} \text{ ом} \cdot \text{см}$; $E_{\text{пр}} = 25 \div 30 \text{ кв/мм}$ при 50 гц (при малых толщинах до 250—350 кв/мм).

П р е и м у щ е с т в а м и стекла являются его дешевизна и высокая электрическая прочность при малых толщинах; о с н о в н ы е н е д о с т а т к и: относительно высокие потери, резко возрастающие с ростом температуры (рис. 189), что создает неустойчивость против теплового пробоя, и большая хрупкость (удельная ударная вязкость менее $1 \text{ кг} \cdot \text{см/см}^2$), затрудняющая обращение со стеклом в условиях производства и мешающая его использованию при небольших толщинах, когда $E_{\text{пр}}$ повышена. При использовании стекла обычного состава при постоянном напряжении и повышенной температуре благодаря недостаточно высокому $\rho_{\text{об}}$ имеет место электролитическое старение, связанное с образованием дендритов у катода, к которому приходят легко подвижные ионы щелочных металлов (см. рис. 98).

Для стеклянных конденсаторов особенно опасна неоднородность поля у края обкладки, так как при появлении короны на краях местный разогрев быстро приводит конденсатор к тепловому пробоя. Поэтому листовое стекло применялось только при напряжениях не выше 4—6 кв; при более высоких напряжениях применяли стеклянные колбы удлиненной формы, позволяющие за счет утолщения стекла у горлышка выровнять поле у края обкладок и устранить опасность появления краевой короны.

Повышенные потери щелочных стекол связаны с наличием в них легкоподвижных одновалентных ионов, которые тем вреднее, чем меньше их радиус: ионы Na^+ дают более сильное возрастание

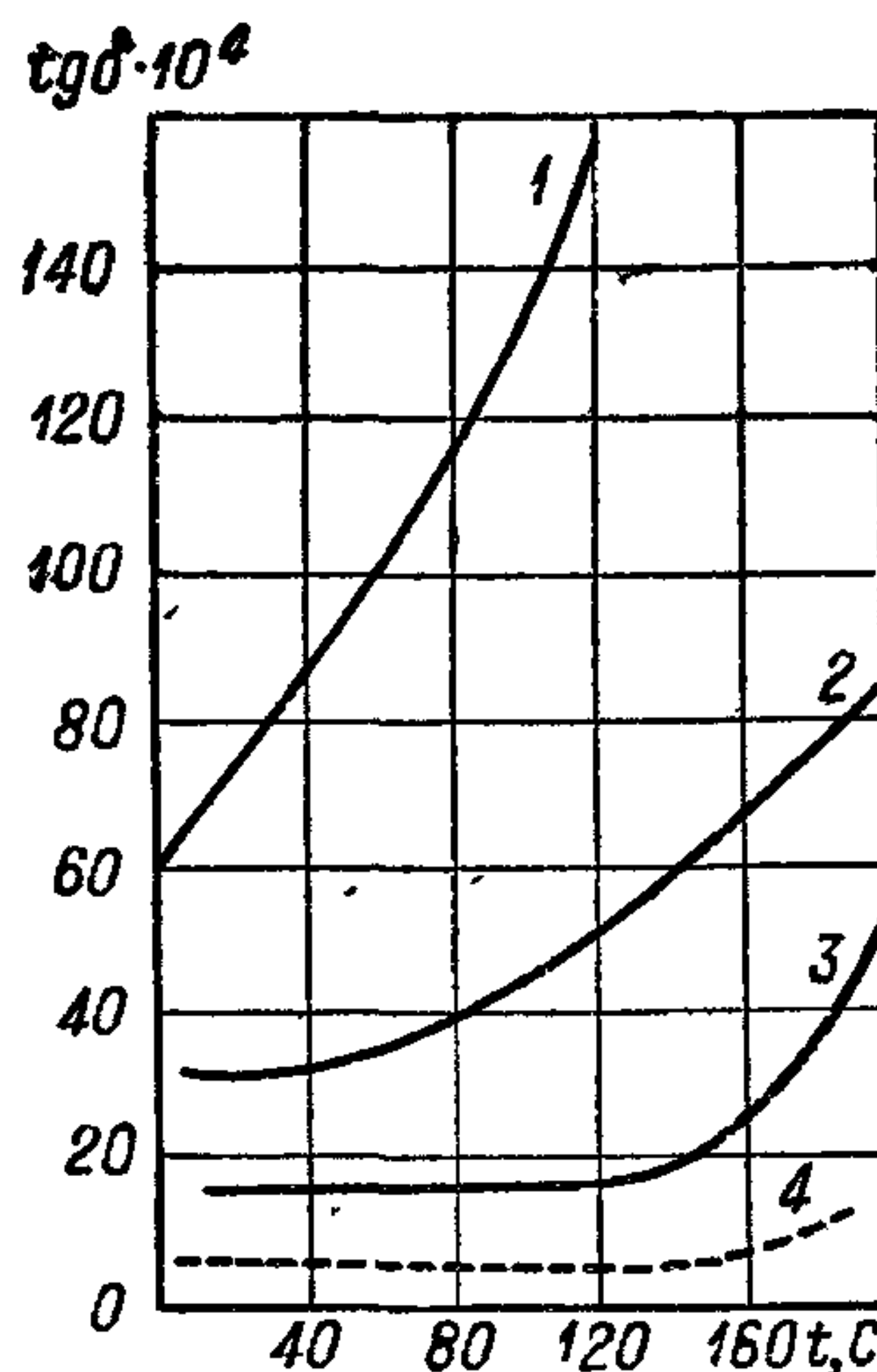


Рис. 189. Зависимость угла потерь различных образцов стекла от температуры (частота 1 Мгц).

1, 2, 3 — щелочное боросиликатное стекло (1 — 14,5% Na_2O ; 2 — 4,5% Na_2O ; 3 — 0% Na_2O); 4 — свинцовосиликатное стекло «Минос».

потерь, чем ионы K^+ . Вместе с тем щелочные ионы способствуют повышению ϵ стекла. Снижение $\operatorname{tg} \delta$ при сохранении повышенного значения ϵ можно получить, добавляя в состав щелочного стекла тяжелые окислы двухвалентных металлов: PbO или BaO . На этом принципе в Германии было разработано специально конденсаторное стекло «М и н о с», которое применялось фирмой Шотт (Германия) для изготовления конденсаторов до начала 40-х годов. Это стекло имело $\epsilon \approx 8$, $\operatorname{tg} \delta < 10 \cdot 10^{-4}$ (1 Мгц), $\rho_{об} = 10^{15} \div 10^{16}$ ом · см и $E_{пр} = 250$ кВ/мм при 50 гц и толщине 0,25 мм. Улучшение электрических свойств стекла «Минос» было достигнуто за счет его удорожания и усложнения технологии обработки; поэтому применение его оправдывалось лишь в Германии ввиду особой дефицитности слюды в этой стране. Удельная реактивная мощность стеклянных конденсаторов фирмы Шотт при частотах 30—300 кГц составляла около 1—2 вар/см³, т. е. была значительно ниже, чем у керамических конденсаторов, которые и вытеснили в Германии стеклянные конденсаторы.

Хрупкость стекла препятствовала применению его в малых толщинах, что ограничивало номинальную емкость стеклянных конденсаторов. Вместе с тем уже давно было показано, что из стекла можно вытягивать очень тонкие нити диаметром порядка нескольких микрон, не обладающие чрезмерной хрупкостью, свойственной стеклу при больших толщинах. Это позволяло надеяться на то, что удастся разработать методику вытяжки из стекла тонких пленок, которые были бы пригодны для использования в конденсаторостроении. Впервые эта задача была решена в США фирмой Корнинг Гласс, которая наладила выпуск стеклянной пленки толщиной 25—50 мкм с плотностью 3,84 г/см³, $\epsilon = 8,4$ и $\operatorname{tg} \delta \approx 5 \cdot 10^{-4}$ (при 20° С и частоте 1 Мгц). Стеклянная пленка выпускается в рулонах, но на втулках большого диаметра; намотке на оправку малого диаметра, как в производстве обычных намотанных бумажных или пленочных конденсаторов, препятствует хрупкость стеклопленки. Поэтому при изготовлении стеклопленочных конденсаторов пленка режется на куски (пластинки), которые складываются стопкой, чередуясь с прокладками из металлической фольги, как при изготовлении слюдяных конденсаторов. Собранные секции помещаются между защитными стеклянными пластинками большей толщины и при повышенной температуре спекаются в монолитные блоки.

Наряду с маленькими конденсаторами на напряжение 300 В изготавливаются также конденсаторы с испытательным напряжением до 6 кВ, с реактивной мощностью до 7—8 квар при частоте 1 Мгц. Максимальная емкость стеклопленочных конденсаторов, изготавливаемых в США, равна 0,1 мкф. При циклических испытаниях стабильность емкости велика: изменение емкости менее 0,1%; ТКЕ равен $+(140 \pm 25) \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ для предела температур $-55 \div +85^\circ \text{C}$, верхний предел температуры $+125^\circ \text{C}$, но может быть повышен при снижении рабочего напряжения в сравнении

с $U_{\text{ном}}$. Объем конденсаторов на $1/3$ меньше объема слюдяных конденсаторов с теми же номинальными данными. Стоимость конденсаторов, несмотря на автоматизацию их производства, выше стоимости слюдяных примерно в 2,5 раза. Особым преимуществом стеклопленочных конденсаторов является их влагостойкость и устойчивость к действию радиации.

В одной из японских работ по стеклянным конденсаторам указан следующий состав стекла для получения конденсаторной стеклопленки: SiO_2 — 40%; PbO — 49,6%; B_2O_3 — 1,46%; K_2O — 3,45%; Na_2O — 3%; Li_2O — 1,2% и Al_2O_3 — 1,1%.

Отечественные стеклопленочные конденсаторы типа К21У-4 (рис. 190) изготавливаются с емкостью 680—10 000 пф при напряжении 300 в и с емкостью 220—4700 пф при напряжении 500 в. Допуск по емкости: ± 5 ; ± 10 и $\pm 20\%$; $\text{ТКЕ} = + (140 \pm 50) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; $\text{tg } \delta$ — не более $20 \cdot 10^{-4}$ при 20°C и не более $25 \cdot 10^{-4}$ при 125°C или после работы в течение 1 месяца в тропических условиях; сопротивление изоляции не менее — 10 000 Мом в нормальных условиях и не менее 5000 Мом при 125°C или

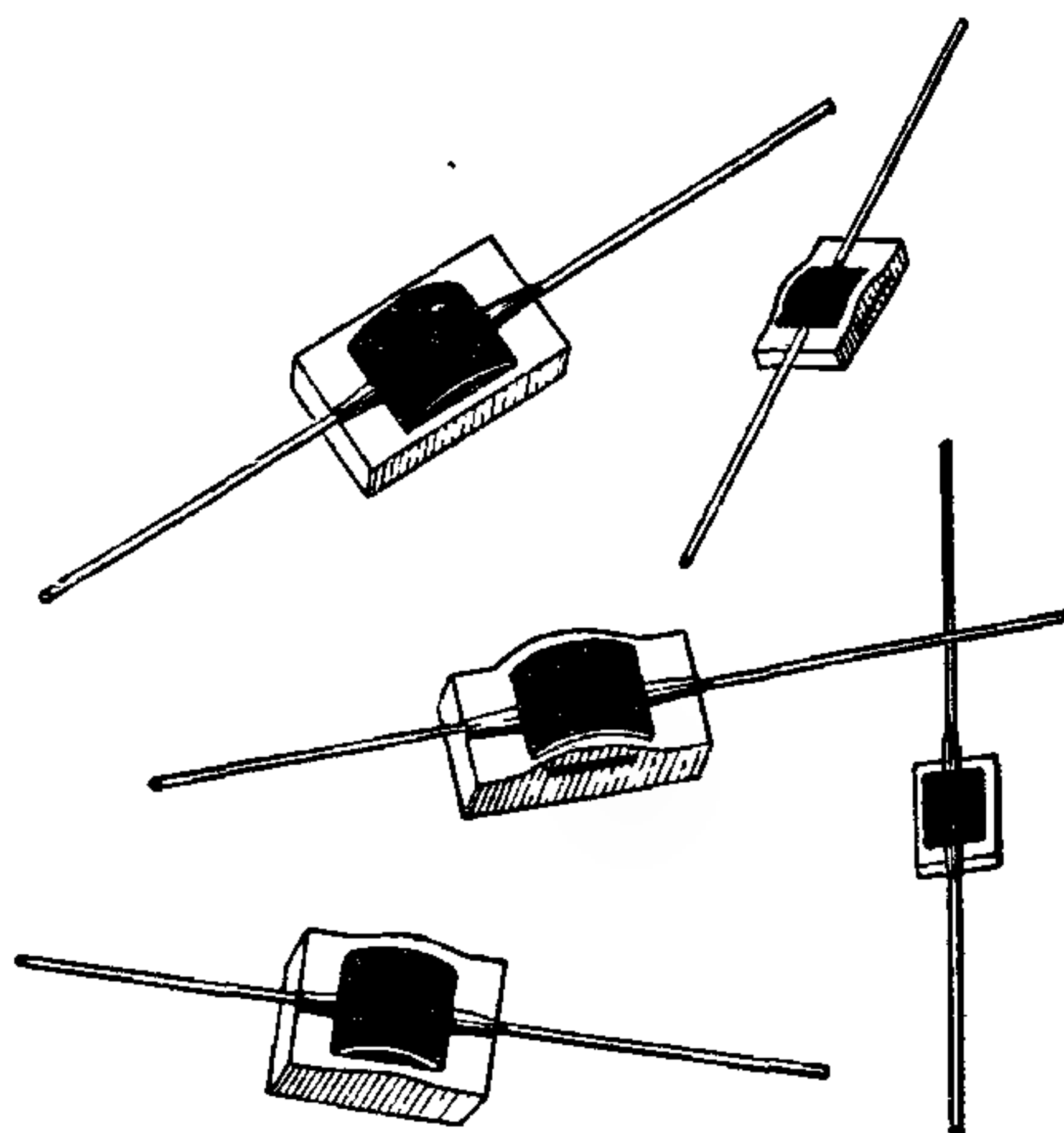


Рис. 190. Стеклопленочные конденсаторы.

после месячной работы в тропических условиях (98% влажность при 40°C). Температурный диапазон применения конденсаторов: от -60 до $+125^\circ \text{C}$. Максимальный заряд конденсаторов К21У-4 составляет 3 мкк ; удельный заряд при этом имеет значение 1,5 мкк/см^3 . Сравнивая это значение с данными табл. 15, можно сказать, что по удельным характеристикам стеклопленочные конденсаторы лежат на том же уровне, что и наилучшие слюдяные конденсаторы.

Представляется весьма заманчивым пытаться изготавливать стеклопленочные конденсаторы путем их намотки из стеклопленки и фольги, как обычные намотанные конденсаторы. Имеются сведения, что в США для этой цели проводятся опыты по намотке сильно нагретой стеклопленки (намоточная оправка вводится для этого в муфельную печь), что позволяет устранить ее хрупкость.

§ 73. Стеклоэмалевые и стеклокерамические конденсаторы

Меняя рецептуру стекла, можно в значительной степени изменять его электрические свойства, в частности ϵ , $\text{ТК}\epsilon$ и $\text{tg } \delta$. Однако в ряде случаев при этом ухудшаются технологические свойства

стекла и практическое его использование затрудняется, как это было, например, в случае стекла «Минос». Эту трудность можно обойти, радикально изменяя технологию изготовления конденсатора, а именно, измельчая стекло в порошок, получая из него тонкие слои, разделенные металлом, и подвергая полученную заготовку нагреву при высокой температуре для спекания в монолитный блок.

Конденсаторы, изготовленные на этом принципе, получили название **стеклоэмалевых**. При небольших значениях емкости, порядка нескольких сотен пикофарад, качество этих конденсаторов приближается к качеству слюдяных конденсаторов

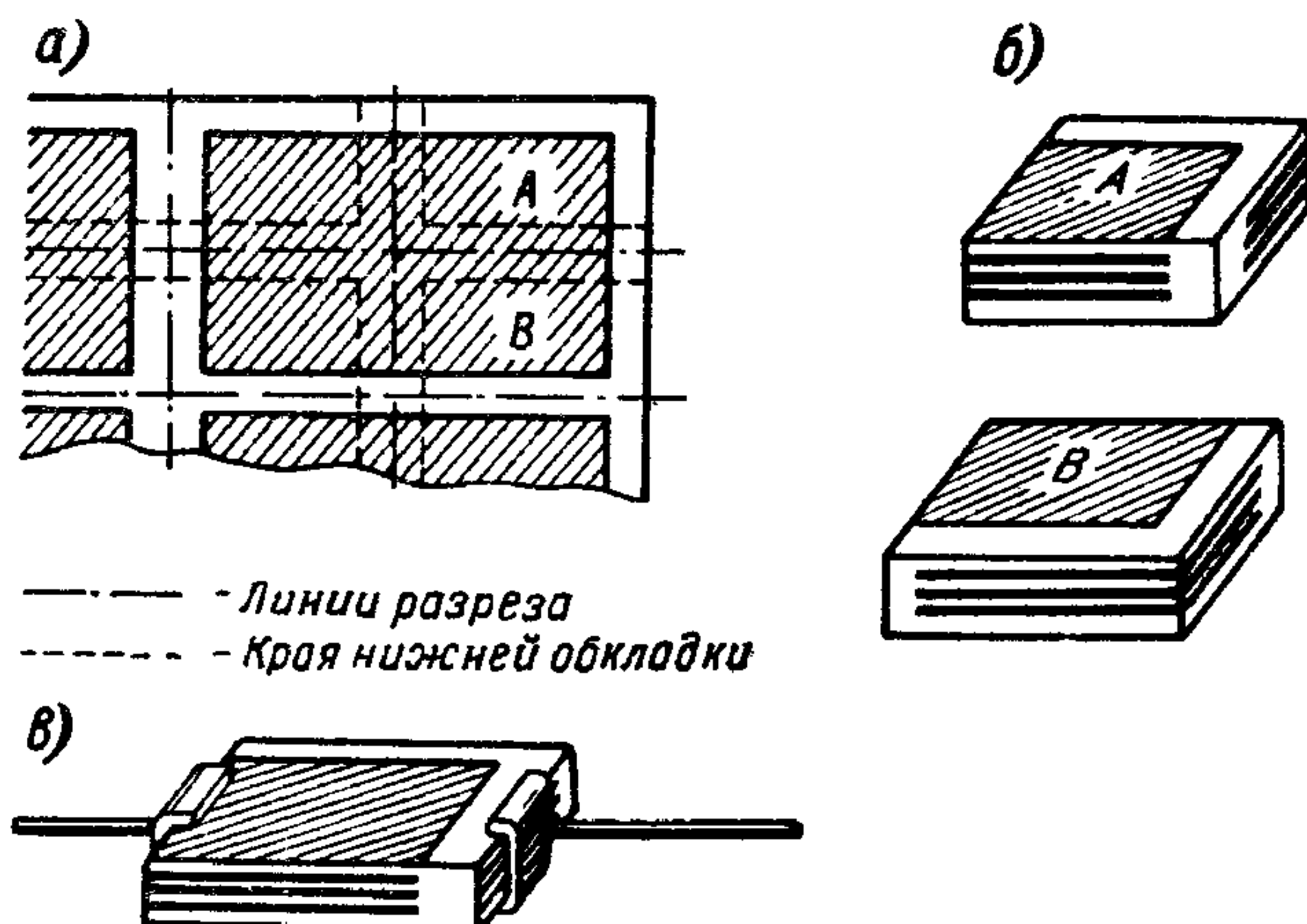


Рис. 191. Стеклоэмалевые конденсаторы: *а* — заготовка до разрезки; *б* — куски разрезанной заготовки; *в* — конденсатор с припаянными выводами.

малой мощности, с которыми стеклоэмалевые конденсаторы могут конкурировать в качестве полноценных заменителей.

Для изготовления стеклоэмалевых конденсаторов было предложено несколько различных методов.

Мокрый метод: на стальные листы, покрытые слоем этилцеллюлозного лака (для устранения прилипания стеклоэмали), наносится с помощью пульверизатора (сопло которого расположено перпендикулярно листу) слой стеклоэмали, растворенной в воде. Толщина слоя регулируется подачей стеклоэмали в пульверизатор; после покрытия слоем эмали стальной лист по конвейеру идет в печь, где под воздействием обогрева инфракрасными лампами слой эмали высыхает до консистенции сыра. После этого, не снимая листа с конвейера, на слой эмали наносят слой серебряной пасты методом печатания. Далее стальной лист возвращается под пульверизатор для вторичного покрытия эмалью, снова идет в сушку и серебрение, причем второй слой пасты наносится с нужным сдвигом для получения закраин. После нанесения требуемого числа слоев заготовка разрезается на несколько частей (рис. 191),

которые подвергаются спеканию при температуре $600\text{—}800^{\circ}\text{C}$, причем образуется монолитная остеклованная структура. При зачистке противоположных торцов полученной секции обнажаются края обкладок противоположного знака; к ним непосредственно припаивают выводы конденсатора. Этот метод был разработан в США. Обычные размеры конденсаторов составляли $7,5 \times 7,5 \times 3$ мм (50 пф) и $12,5 \times 12,5 \times 3$ мм (350 пф).

Сухой метод: стеклоэмалевый порошок засыпается в бункер автоматического пресса. Из бункера по трубе порошок поступает в засыпающую лапу, которая, совершая возвратно-поступательное движение, засыпает порошок в вырез подвижной матрицы. Последняя подходит под пуансон пресса, который, опускаясь в матрицу, спрессовывает находящуюся в ней порцию порошка; толщина спрессованного слоя определяется высотой ступени дозирочного барабана. Далее пуансон поднимается и матрица продвигается к пульверизационному устройству, которое наносит поверх слоя стеклоэмали слой серебряной пасты по определенному шаблону (окно в трафаретной ленте). После этого матрица возвращается в исходное положение, снова принимает порцию порошка, снова подходит под пуансон, опрессовывающий второй слой порошка; далее матрица снова попадает под пульверизатор, который наносит новый слой серебряной пасты, но уже со сдвигом, через другое окно трафаретной ленты. Эти операции повторяются до получения нужного числа слоев. Таблетки, полученные из автомата, подвергаются спеканию в конвейерной печи при максимальной температуре порядка 700°C , после чего набираются в кассеты и проходят на конвейере мимо пескоструйного аппарата, зачищающего у них противоположные торцы. После зачистки торцы таблеток серебрятся на механизированном устройстве с последующим обжигом пасты на торцах в конвейерной печи. На контрольных автоматах таблетки испытываются на пробой и у них проверяется емкость. После этого торцы еще раз серебрятся, лудятся, и к ним припаиваются выводы (на полуавтомате). За этим следуют промывка, сушка и окраска конденсаторов с последующей сушкой защитного лака в туннельной печи. После испытания на пробой и проверки емкости на контрольных автоматах конденсаторы маркируются, затем сушатся, проходя автоматы выходного контроля, и поступают на упаковку. Этот метод разработан в СССР; он позволяет получать толщину диэлектрика порядка $0,25\text{—}0,3$ мм; при меньших толщинах резко возрастает брак по пробой и по наличию короткозамкнутых конденсаторов.

Пленочный метод использует опыт керамической технологии. Из шликера, составленного на основе стеклянного порошка и специальной органической связки, отливают тонкие пленки толщиной порядка 150 мкм. Из таких пленок и тонкой серебряной фольги собираются конденсаторные секции, которые затем проходят операцию спекания для остекловывания эмали. При этом

заготовки дают усадку и толщина диэлектрика снижается до 100—120 мкм. Это позволяет заметно повысить емкость стеклоэмалевых конденсаторов по сравнению с изготовленными предыдущим методом.

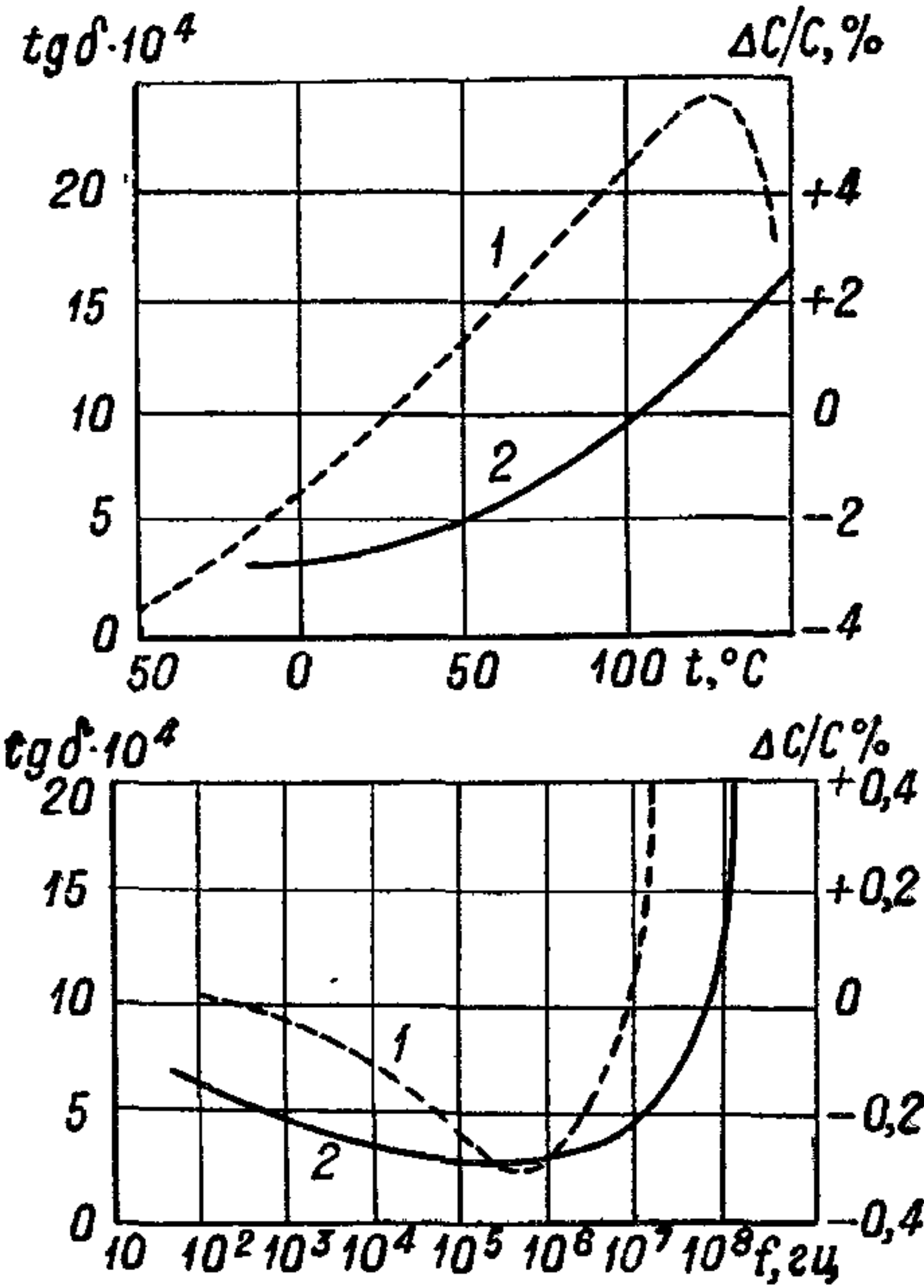


Рис. 192. Зависимость емкости (1) и угла потерь (2) стеклоэмалевых конденсаторов от температуры ($f = 1 \text{ МГц}$, $C = 500 \text{ пф}$) и от частоты.

200 пф при напряжении 300 в ($-60 \div +155^\circ \text{C}$) и емкостью от 10 до 1000 пф при 500 в ($-60 \div +100^\circ \text{C}$). По величине ТКЕ и изменению емкости конденсаторы КС разделяются на следующие группы:

Обозначение группы	Изменение емкости в интервале $-60 \div +20^\circ \text{C}$, %, не более	ТКЕ $\times 10^6 \text{ град}^{-1}$ в интервале $+20 \div +t_{\text{макс}}$
Р	$\pm 1,5$	$+(65 \pm 35)$
О	$\pm 0,5$	(0 ± 30)
М	± 2	$-(47 \pm 30)$
П	± 2	$-(130 \pm 50)$

Допуск по емкости составляет ± 2 ; ± 5 ; ± 10 и $\pm 20\%$; допускаемая реактивная мощность в зависимости от размеров: 15—200 вар. При 20°C $\text{tg } \delta$ должен быть не более $15 \cdot 10^{-4}$, а при $t_{\text{макс}}$ — не более $10 \cdot 10^{-4}$; сопротивление изоляции соответственно не менее $2 \cdot 10^4 \text{ Мом}$ и не менее $1,5 \cdot 10^4 \text{ Мом}$. После пребывания в течение 96 ч при влажности 98% и 40°C $\text{tg } \delta$ не должен превышать $30 \cdot 10^{-4}$ и сопротивление изоляции — $2 \cdot 10^3 \text{ Мом}$. При хранении

конденсаторов в течение 7 лет и в течение гарантированного срока службы изменение емкости составляет не более $\pm 2\%$ сверх установленных допусков.

Наибольшее значение запасенного заряда у конденсаторов КС составляет 0,5 мкк и максимальный удельный заряд 0,28 мкк/см³.

Желание раздвинуть диапазон емкостей конденсаторов данного типа и улучшить их удельные характеристики привело к идее о повышении ϵ диэлектрика введением в состав стеклоэмали мелко измельченной керамики с высокой ϵ из материалов типа А, класса I б или II а. (табл. 15). Конденсаторы такого типа получили название *стеклокерамических*. За рубежом их также не совсем правильно иногда называют фарфоровыми (porcelain capacitors). В США конденсаторы этого типа изготавливаются на напряжение 500 в, емкостью до 6800 пф с характеристиками, близкими к стеклоэмалевым по величине $\operatorname{tg} \delta$ и стабильности во времени, но по-видимому, с измененной величиной ТКЕ. Технология изготовления стеклокерамических конденсаторов похожа на технологию производства стеклоэмалевых конденсаторов с тем различием, что после утильного обжига производится опрессовка конденсаторов в горячем виде (740—840° С, 20—60 кг/см²) для уменьшения пористости диэлектрика и увеличения влагостойкости конденсатора.

Производство стеклокерамических конденсаторов освоено и в СССР. Для таких конденсаторов можно иметь значения удельного заряда, уже приближающиеся к тем значениям, которые имеют слюдяные конденсаторы, хотя по максимальным значениям номинальной емкости эти конденсаторы еще уступают слюдяным.

Г. ТОНКОСЛОЙНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ С НЕОРГАНИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

§ 74. Общие сведения о тонкослойных конденсаторах

Как уже отмечалось, основным недостатком неорганических материалов при их использовании в конденсаторостроении является их неудовлетворительная механическая прочность в малых толщинах, что ограничивает возможность снижения толщины диэлектрика и повышения как номинальной, так и удельной емкости. Этот недостаток преодолевается за счет использования неорганических диэлектриков с высокой диэлектрической проницаемостью, позволяющих резко повысить и $C_{\text{ном}}$ и $c_{\text{уд}}$ даже при относительно больших толщинах, порядка 0,1—0,2 мм. Однако это достигается за счет ухудшения других характеристик конденсатора: резкого повышения угла потерь, снижения стабильности емкости с температурой и во времени, ухудшения постоянной времени, снижения электрической прочности.

Однако, если использовать принцип введения в конденсатор механической поддержки в виде изоляционной или

проводящей пластинки (подложки), на которую будет нанесен тонкий слой неорганического диэлектрика, то от последнего уже не надо требовать механической прочности и толщина его будет определяться только технологическими возможностями его нанесения. Этим методом, используя новые технологические принципы, можно получать весьма малые толщины неорганического диэлектрика, порядка тысяч или даже сотен ангстрем ($1 \text{ мкм} = 10\,000 \text{ \AA}$). Схема устройства тонкослойного конденсатора, изготовленного на таком принципе, показана на рис. 193. На подложку 1 наносится первая обкладка в виде тонкого металлического слоя 2; на эту обкладку тем или иным способом наносится тонкий слой диэлектрика 3, а на него — вторая металлическая обкладка 4. В такой системе возможность резкого увеличения $c_{уд}$ за счет использования

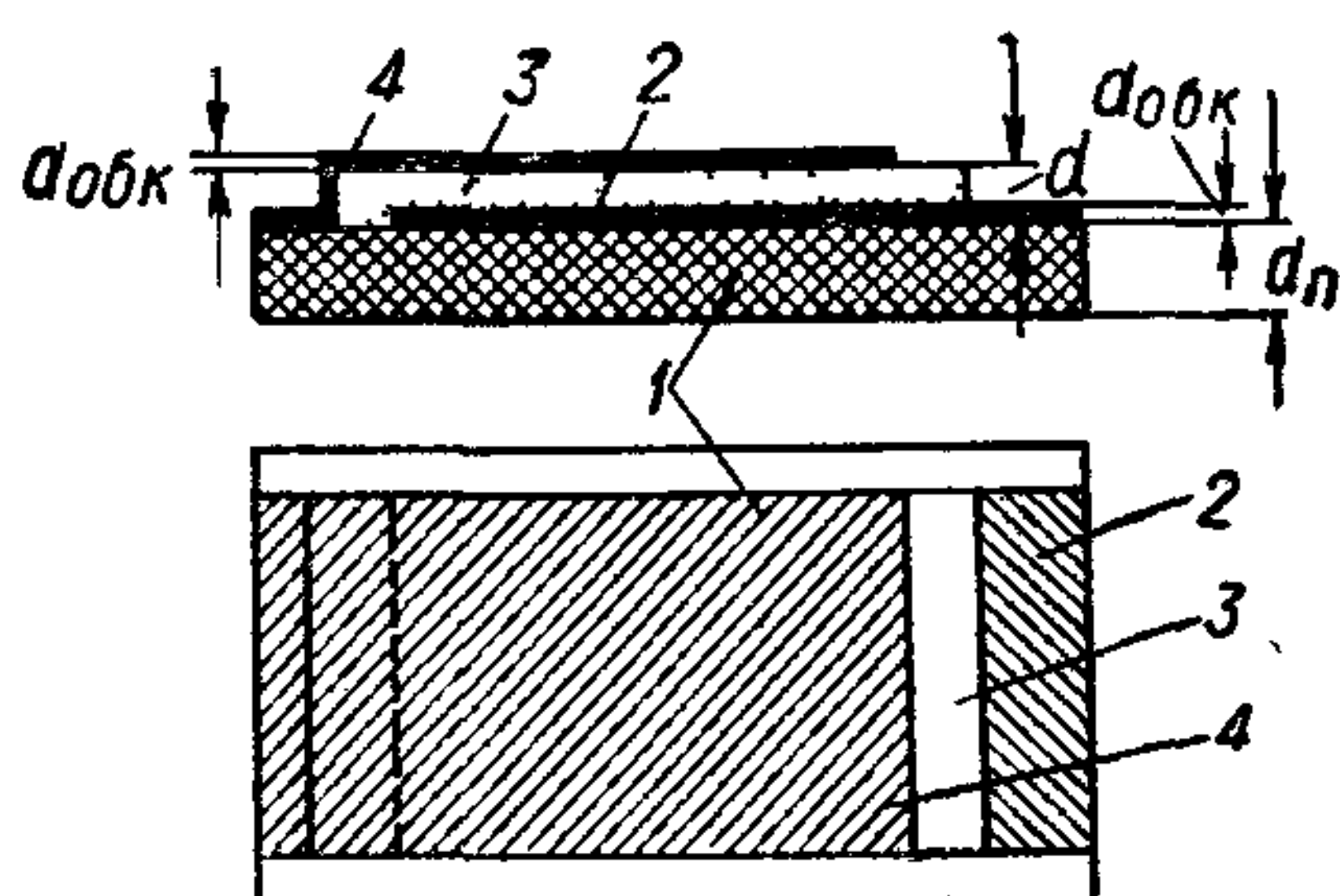


Рис. 193. Схема устройства тонкослойного конденсатора.

1 — подложка; 2 — первая обкладка;
3 — диэлектрик; 4 — вторая обкладка.

малых толщин диэлектрика ограничивается наличием подложки, не используемой для создания емкости и увеличивающей общий объем конденсатора, который в данном случае будет равен (если пренебречь закраинами и влагозащитным покрытием)

$$V = S(d + 2d_{об} + d_{п}) [\text{см}^3], \quad (262)$$

где S — площадь обкладки в см^2 , а d , $d_{об}$ и $d_{п}$ — соответственные значения толщин диэлектрика, обкладки и подложки в см .

Используя для величины емкости формулу плоского конденсатора (2), получаем выражение для удельной емкости:

$$c_{уд} = 0,0884 \frac{\varepsilon}{d(d + 2d_{об} + d_{п})} [\text{нф/см}^3]. \quad (263)$$

Обычно $d_{об} \approx 0,1 \div 0,2 \text{ мкм}$, $d \approx 0,1 \div 2 \text{ мкм}$, а $d_{п} \approx 25 \div 50 \text{ мкм}$ (в качестве подложки применяют тонкие стеклянные или глазурированные керамические пластинки). В этом случае $d_{п} \gg d_{об}$ и d , а поэтому выражение (263) приобретает вид:

$$c_{уд} = 0,0884 \frac{\varepsilon}{dd_{п}}. \quad (264)$$

Таким образом, величина $c_{уд}$ в таких конденсаторах определяется не квадратом толщины диэлектрика, как в обычной формуле (232), а лишь первой степенью толщины; кроме того, $c_{уд}$ снижается с увеличением толщины подложки.

В ряде случаев для тонкослойных конденсаторов величину удельной емкости характеризуют не отношением емкости к объему конденсатора, а отношением емкости к площади обкладки: $c'_{уд} = \frac{C}{S}$ в нф/см^2 . Эта величина, очевидно, пропорциональна отношению ε/d .

Величина номинальной емкости конденсаторов данного типа ограничивается тем, что из технологических соображений приходится брать подложки относительно небольших размеров, что не позволяет использовать большие значения площади обкладки S . Этот недостаток отчасти можно преодолеть, применяя многослойную конструкцию, т. е. чередуя несколько слоев диэлектрика и обкладок на одной и той же подложке. Однако и этим путем редко удастся получать $C_{\text{ном}}$ выше нескольких десятков тысяч пикофарад. Кроме того, применение многослойных конструкций усложняет технологию и удлиняет процесс изготовления конденсатора.

В настоящее время тонкослойные конденсаторы этого типа находят себе основное применение не столько в виде отдельных конденсаторов, сколько в виде емкостных элементов плоских пленочных схем, наносимых на общую подложку с пленочными резисторами, соединительными проводниками и другими плоскими элементами. Тем не менее, в ряде случаев тонкослойные конденсаторы находят себе применение и в виде отдельных «навесных» деталей.

При малых толщинах диэлектрика, даже при указанных выше ограничениях, удельные емкости могут быть достаточно велики. Так например, при $\epsilon \approx 6$ и толщине диэлектрика $0,1 \text{ мкм}$ величина $\epsilon'_{\text{уд}}$ равна $5 \cdot 10^4 \text{ пф/см}^2$ и, даже при толщине подложки 50 мкм , величина $\epsilon_{\text{уд}} = 10 \text{ мкф/см}^2$; однако уже при толщине диэлектрика 1 мкм величина $\epsilon_{\text{уд}}$ снижается до 1 мкф/см^2 ; если учесть наличие влагозащитного покрытия порядка 1 мм (на обе стороны), то получим $\epsilon'_{\text{уд}}$ порядка $0,05 \text{ мкф/см}^2$. Это меньше тех значений, которые можно получать для современных малогабаритных керамических конденсаторов, изготовленных из материалов с высокой ϵ .

Некоторые сведения о диэлектриках, которые применяются или опробуются при изготовлении тонкослойных конденсаторов различными методами, приведены в табл. 19.

Таблица 19

Некоторые диэлектрики, опробованные в тонкослойных конденсаторах

Диэлектрик	ϵ	$\text{tg } \delta \cdot 10^4$ (1 кГц)	$E_{\text{пр}}$ кв/мм	$t_{\text{кип}}, \text{C}$, (0,01 мм рт. ст.)
Криолит Na_3AlF_6	5—6	200—300	100	1000
Сернистый цинк ZnS	8—8,2	50	20—50	1200
Моноокись кремния SiO	5—6,8	100—300	100—300	1300
Фтористый магний MgF_2	5—6,5	150—200	100—200	1400
Фтористый церий CeF_3	8—52	500—650	—	—
Окись кремния SiO_2	4—4,2	20—50	350	1700
Окись диспрозия Dy_2O_3^*	4,5	—	400	1700
Окись тантала Ta_2O_5	25	30—60	400—500	—

* С добавкой 10% B_2O_3 и 10% SiO_2 .

При изготовлении тонкослойных конденсаторов с неорганическим диэлектриком были опробованы следующие технологические методы: а) испарение в вакууме, б) катодное распыление, в) термическое окисление, г) термическое разложение (пиролиз).

Получение тонкослойного диэлектрика испарением в вакууме. Для этой цели используется такая же установка, как и для вакуумного нанесения тонких слоев металла (§ 22, рис. 37), в которой, кроме испарителя для металла, необходимо предусмотреть также

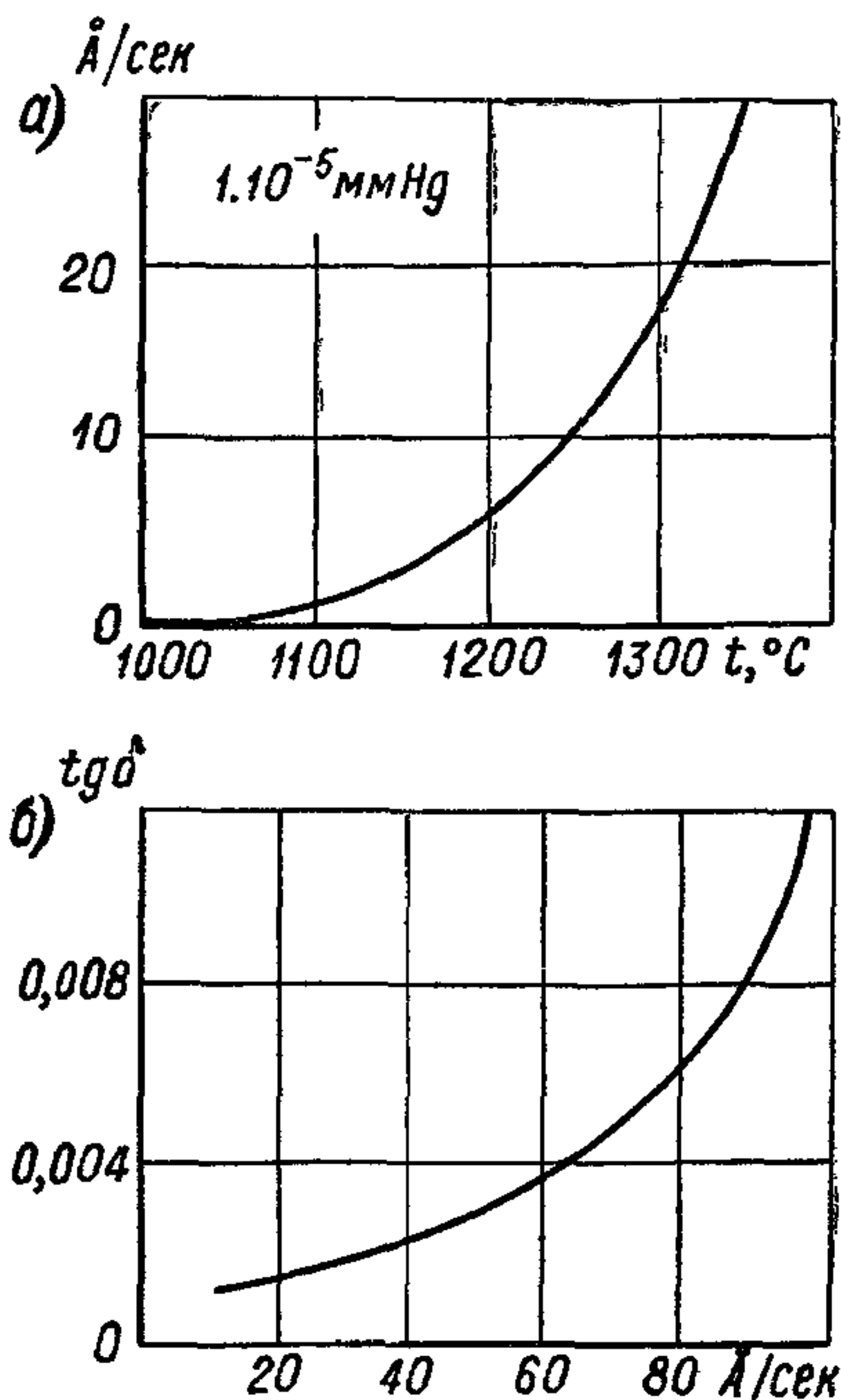


Рис. 194. Зависимость скорости испарения от температуры (а) и угла потерь от скорости испарения (б) при изготовлении конденсаторов с диэлектриком из монооксида кремния.

испаритель для диэлектрика. При испарении диэлектриков обычно добиваются остаточного давления менее 10^{-5} мм рт. ст. Скорость испарения, т. е. скорость образования слоя диэлектрика на подложке, можно повышать, увеличивая температуру испарителя (рис. 194, а), но при больших скоростях испарения может наблюдаться ухудшение электрических свойств полученных слоев (рис. 194, б). Поэтому обычно применяемые скорости испарения при работе этим методом составляют 5—15 Å/сек. Таким образом, при средней скорости 10 Å/сек для получения слоя толщиной 1 мкм требуется около 1000 сек, или порядка 16—17 мин.

При выборе диэлектрика, пригодного для изготовления тонкослойных конденсаторов методом испарения в вакууме, требуют, чтобы он легко испарялся (т. е. имел невысокую $t_{кип}$), без разложения, имел бы хорошую адгезию к электродам и чтобы в образо-

ванном при испарении тонком слое не возникало больших внутренних напряжений, особенно растягивающих. Кроме того, надо требовать достаточно высоких электрических свойств: высоких ϵ и $E_{пр}$, малого $tg \delta$ и достаточно большого $\rho_{об}$. Возникновение растягивающих остаточных напряжений опасно потому, что пленка с такими напряжениями склонна к растрескиванию, что снижает ее электрическую прочность. Среди диэлектриков, указанных в табл. 19, склонностью к появлению растягивающих напряжений обладают Na_3AlF_4 и MgF_2 , что ограничивает возможность их применения. Указанные в табл. 19 значения угла потерь для разных тонкослойных диэлектриков относятся к частоте 1 кГц; при повышении частоты большинство указанных в таблице диэлектриков

снижает $\operatorname{tg} \delta$, но у тонкослойных конденсаторов за счет потерь в обкладках малой толщины при частотах выше 10—100 кГц угол потерь заметно возрастает (рис. 195).

В качестве металла для обкладок применяют золото, медь, алюминий и хром. Из них Au и Cr, обладающие повышенным сопротивлением, дают ухудшение частотной зависимости $\operatorname{tg} \delta$; наилучшую способность обеспечивать самовосстановление конденсатора при пробое дает Al. От металла для обкладок требуется высокая проводимость, легкая испаряемость и адгезия к подложке и к диэлектрику.

Перед нанесением на подложку первой обкладки необходима тщательная очистка поверхности, которая проводится обезжириванием и ионной бомбардировкой в вакууме.

Среди диэлектриков, приведенных в табл. 19, по температуре кипения и отсутствию опасных растягивающих напряжений наиболее удобны для использования ZnS

и SiO. Преимуществом первого из них является более высокая ϵ и меньший $\operatorname{tg} \delta$, но $E_{\text{пр}}$ у него резко снижена, а потому предпочтение отдают SiO. Этот диэлектрик нашел сейчас преимущественное применение в тонкослойных конденсаторах, изготовляемых испарением в вакууме. Данные о свойствах монооксида кремния, которые можно найти в литературе, имеют большой разброс в связи с тем, что в тонкослойном диэлектрике обычно присутствуют переходные окислы, например Si_2O_3 . Для чистой SiO можно принять $\epsilon \approx 6$. При номинальных напряжениях 12—60 в толщина диэлектрика составляет 0,15—2 мкм, что соответствует значениям $E_{\text{раб}} = 80 \div 30 \text{ кВ/мм}$. В зависимости от толщины слоя величина $\epsilon_{\text{уд}}$ доходит до 0,01 мкф/см² для однослойной конструкции и до 0,06—0,07 мкф/см² при 7 слоях. Величина ТКЕ сильно зависит от температурной обработки после нанесения слоя (рис. 196). Если без термообработки в пределах 20—100° С величина ТКЕ равна $+1150 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, то после выдержки

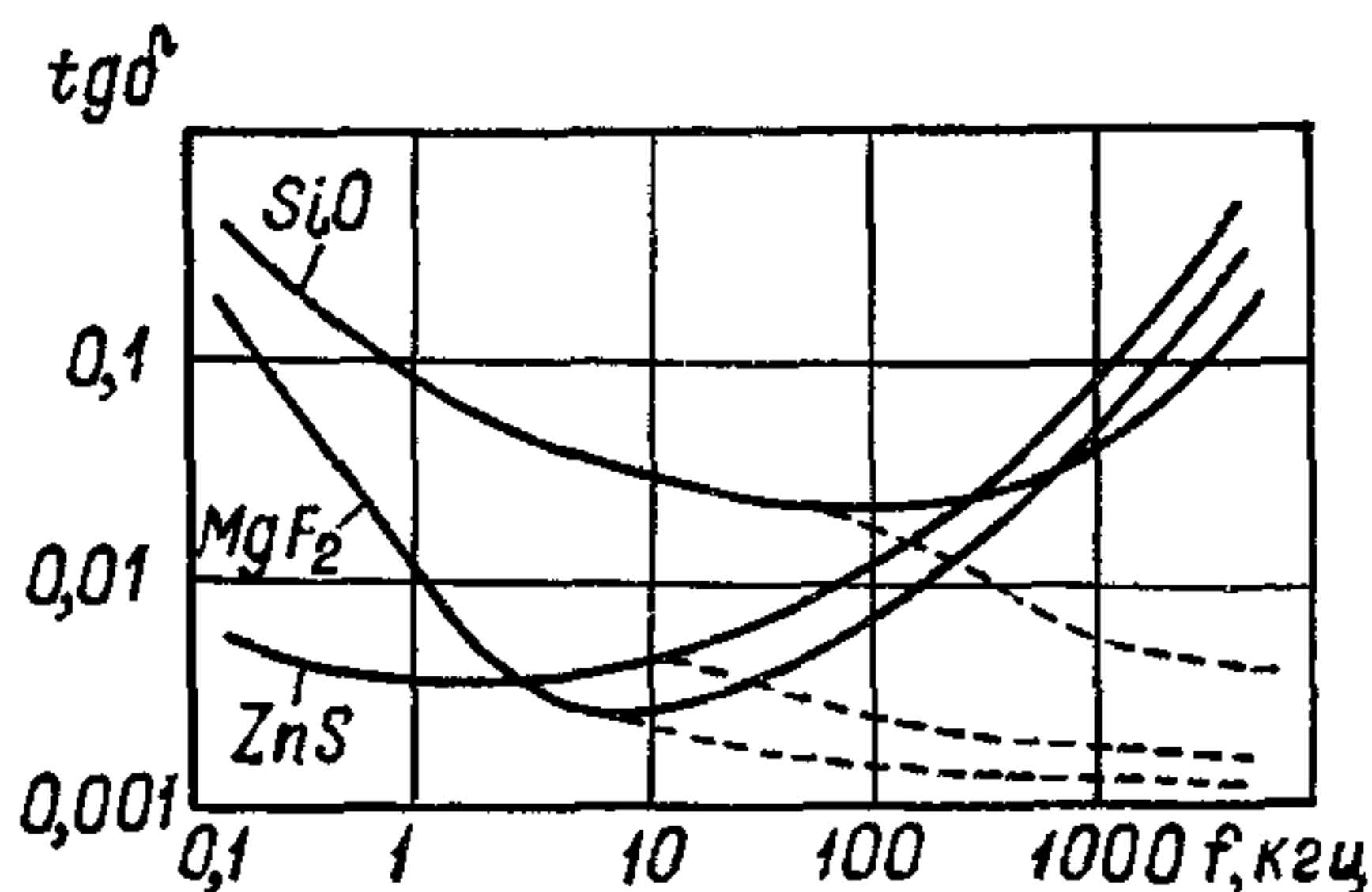


Рис. 195. Зависимость угла потерь тонкослойных конденсаторов с тремя разными диэлектриками от частоты (пунктиром показана величина угла потерь за вычетом потерь в обкладках).

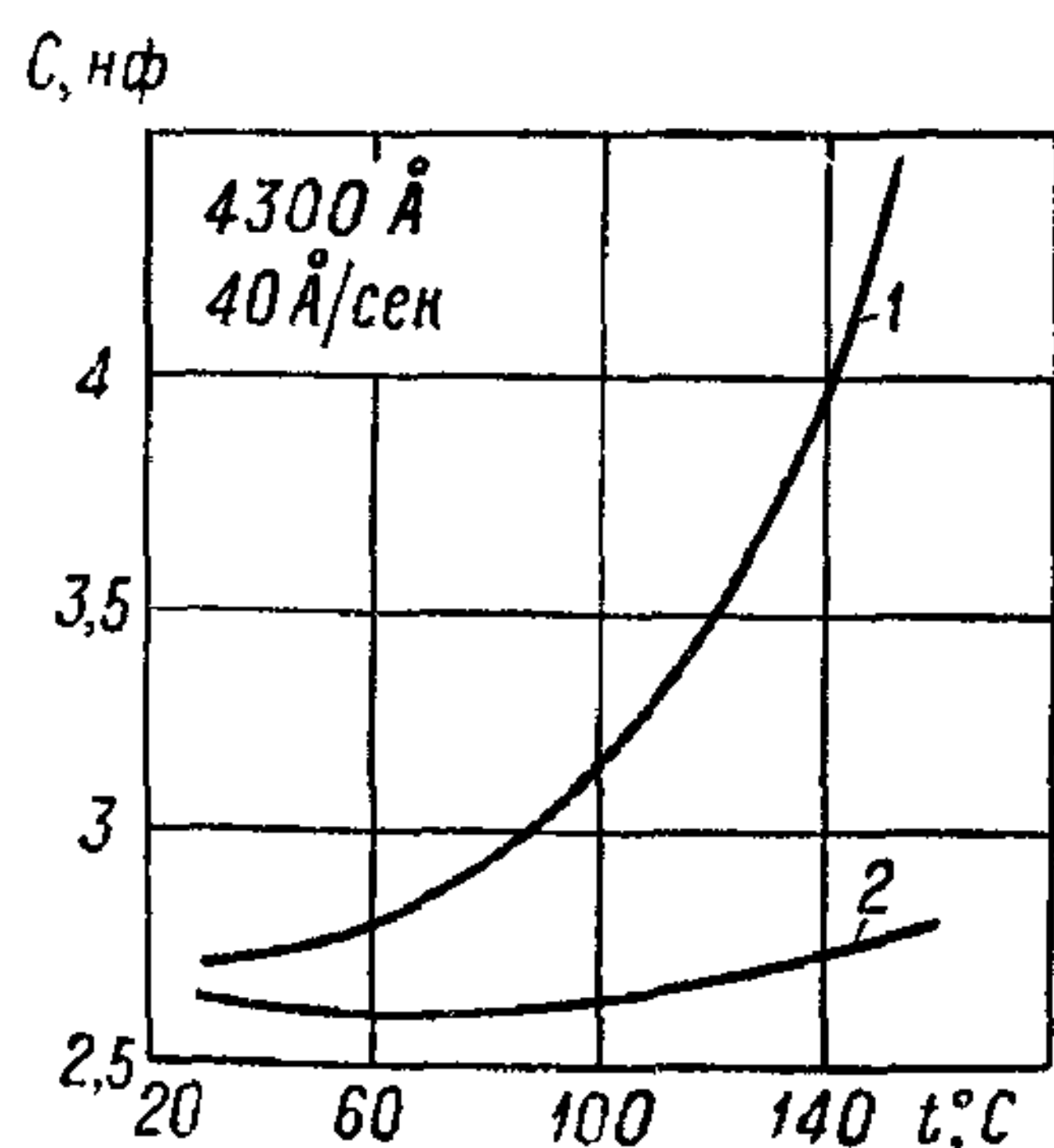


Рис. 196. Зависимость емкости тонкослойного конденсатора из монооксида кремния от температуры.

1 — до термообработки; 2 — после термообработки в течение 30 мин при 400° С.

величина $\epsilon_{\text{уд}}$ доходит до 0,01 мкф/см² для однослойной конструкции и до 0,06—0,07 мкф/см² при 7 слоях. Величина ТКЕ сильно зависит от температурной обработки после нанесения слоя (рис. 196). Если без термообработки в пределах 20—100° С величина ТКЕ равна $+1150 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, то после выдержки

30 мин при 400°C величина ТКЕ снижается до $+110 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. В литературе можно найти значения ТКЕ $+(350 \div 700) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, видимо, соответствующие недостаточной термообработке. После термообработки при $400\text{—}450^\circ\text{C}$ величина $\text{tg } \delta$ снижается и в пределах до $100\text{—}125^\circ\text{C}$ может быть менее $50 \cdot 10^{-4}$ (1 кГц), тогда как часто указывают значения порядка $100 \div 300 \cdot 10^{-4}$. Постоянная времени таких конденсаторов обычно превышает 200 ом·ф. Как диэлектрик монооксид кремния SiO значительно уступает окиси кремния SiO_2 (если не считать ее несколько повышенной ϵ), но высокая нагревостойкость окиси кремния до последнего времени препятствовала ее применению в тонкослойных конденсаторах, получаемых испарением в вакууме, а потому для использования этого диэлектрика приходилось пользоваться другими

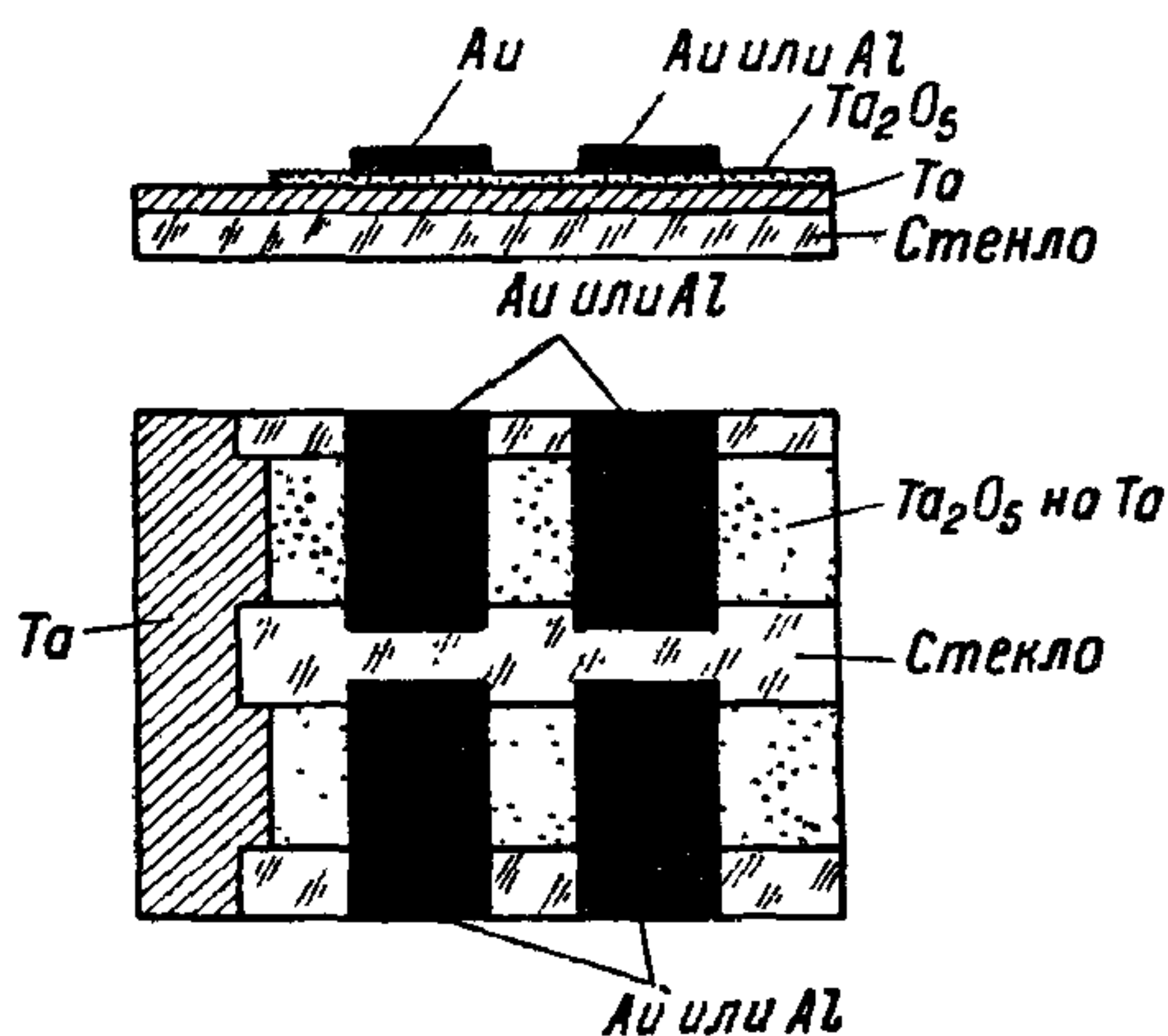


Рис. 197. Схема устройства танталового оксиднометаллического конденсатора.

методами, описанными ниже. В настоящее время при использовании такого мощного источника локализованного нагрева, как пучок электронов («электронная пушка») были проведены удачные попытки получения тонких слоев SiO_2 на подложке из разогретого вольфрама путем испарения в вакууме. Скорость испарения достигала 3 \AA/сек .

Катодное распыление. Этот метод при его использовании для нанесения металлических обкладок нами уже упоминался (§ 22, рис. 44). При нанесении слоя металла под колоколом поддерживается атмосфера инертного газа, например аргона при давлении $10^{-2}\text{—}10^{-1} \text{ мм рт. ст.}$. Полученный этим методом слой тугоплавкого металла, например тантала, может быть далее электролитически окислен для получения на нем тонкого слоя диэлектрика. Можно использовать и другой метод, а именно: заменить под колоколом инертный газ кислородом. При этом выбитые из катода частички металла окисляются в атмосфере кислорода и на подложку, укрепленную на аноде, откладывается уже не металл, а его окисел, т. е. слой диэлектрика. Этим путем были получены тонкие слои из Ta_2O_5 , BeO и SiO_2 . Ввиду медленности процесса катодного распыления по сравнению с вакуумным испарением (порядка $0,1\text{—}1 \text{ \AA/сек}$) толщина слоев диэлектрика, как и металла, обычно не превышает $0,1\text{—}0,2 \text{ мкм}$. По-видимому, пока наибольшее продвижение в практику получили изготовленные этим методом металлооксидные танталовые конденсаторы, в которых на изоляционную подложку наносится катодным распылением слой Ta, служащий первой обкладкой, далее образуется на нем слой Ta_2O_5 за счет

электролитического окисления, а поверх него вакуумным испарением наносится тонкий слой золота или алюминия (рис. 197). По данным одной из зарубежных фирм, выпускаются конденсаторы со следующими характеристиками: $C_{\text{ном}} = 500 \div 20\,000 \text{ пф}$; допуск $\pm 5\%$; $\text{tg } \delta \approx 30 \div 50 \cdot 10^{-4}$ при 1 кГц и $2000 \cdot 10^{-4}$ при 1 МГц ; $\text{ТКЕ} = +250 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; постоянная времени $1000 \text{ ом} \cdot \text{ф}$; $U_{\text{пр}} = 140 \div 185 \text{ в}$ при формовочном напряжении $200\text{—}220 \text{ в}$. Верхний предел рабочей температуры $+85^\circ \text{С}$. Площадь обкладок 13 мм^2 . Рабочее напряжение $10\text{—}65 \text{ в}$. Указанные выше значения $U_{\text{пр}}$ относятся к анодному включению Та; при обратном включении $U_{\text{пр}}$ в 2—3 раза ниже (см. также § 89).

Термическое окисление. Этот метод используется для изготовления тонкослойных конденсаторов с диэлектриком из SiO_2 . Небольшие диски из чистого кремния n -типа с удельным сопротивлением менее $0,1 \text{ ом} \cdot \text{см}$ нагреваются до 950°С в присутствии паров воды, причем на поверхности кремния

за счет окисления образуется тонкий слой SiO_2 . Кинетика его нарастания показана на рис. 198. Средняя скорость составляет около $0,25 \text{ Å/сек}$, т. е. невелика. При толщине слоя $0,7\text{—}2 \text{ мкм}$, $E_{\text{пр}} = 400 \div 500 \text{ кВ/мм}$ $E_{\text{раб}}$ составляет до 80 кВ/мм . Поверх слоя окиси кремния с обеих сторон диска наносят металлические обкладки. При этом, как и в случае конденсатора с барьерным слоем (§ 69, рис. 178, ж), получаются две

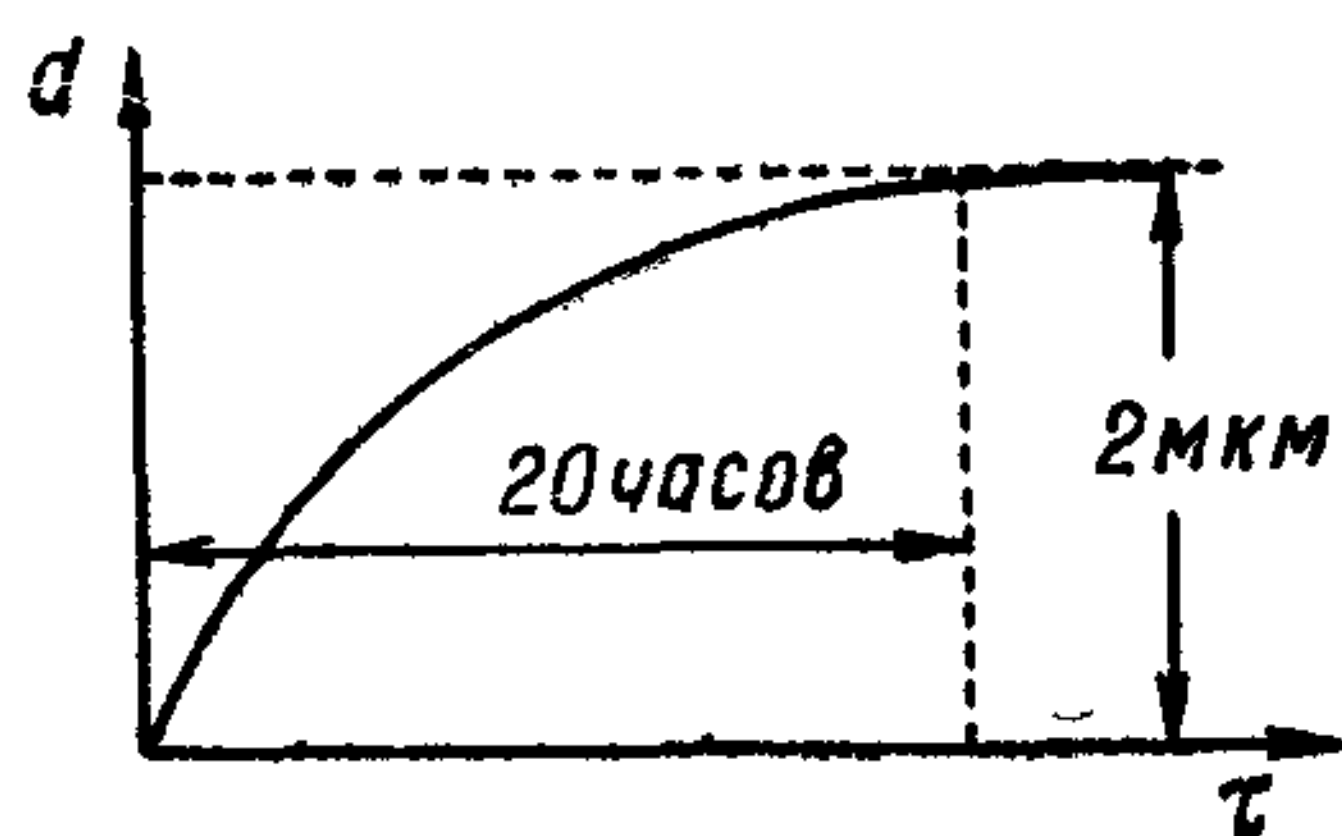


Рис. 198. Кинетика увеличения толщины слоя окиси кремния в процессе термического окисления.

емкости, включенные последовательно через промежуточный слой полупроводника — кремния. Такие конденсаторы получили за рубежом название: конденсаторы типа «Оксил». В отличие от керамических конденсаторов с барьерным слоем, имеющих большой $\text{tg } \delta$, в конденсаторах «Оксил» $\text{tg } \delta \approx 1 \div 2 \cdot 10^{-4}$ при 1 кГц . Это объясняется тем, что последовательно включаемое сопротивление Si много меньше, чем сопротивление полупроводящего BaTiO_3 или TiO_2 ; кроме того, слой SiO_2 имеет очень малые диэлектрические потери.

При диаметре дисков от 3 до 10 мм величина $C_{\text{ном}}$ составляет от 30 до 1000 пф ; $\text{ТКЕ} = +(20 \pm 15) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ для незащищенных от влажности дисков и $+(35 \pm 15) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ для покрытых влагозащитным компаундом. Сопротивление изоляции — выше 10^5 Мом . До 100 кГц $\text{tg } \delta$ мало изменяется с частотой, далее уже начинает сказываться последовательно включенное сопротивление слоя Si. Температурный интервал работы конденсаторов «Оксил»: $-55 \div +125^\circ \text{С}$.

Преимуществом конденсаторов типа «Оксил», кроме малых потерь и высокой стабильности емкости, является также большая устойчивость к радиации. Нанесение слоя окиси на поверхности можно ускорить и проводить при более низких температурах, порядка 270°С , если использовать окисление в плазме.

Термическое разложение. Этим методом также можно получить тонкий слой SiO_2 , используя пиролиз паров кремнийорганических соединений (полисилоксанов). В качестве подложки, служащей одновременно первой обкладкой, применяют тугоплавкие металлы Ta, W и Mo или Si. Температура пиролитического разложения составляет $650\text{—}850^\circ\text{C}$. Для разложения могут использоваться различные представители класса полисилоксанов, например этилтриэтилсилоксан или тетраэтилсилоксан и др. Так, при термическом разложении тетраэтилсилоксана выделяются окись кремния, углеводороды и сложные продукты, содержащие, кроме C и H, также кремний и кислород:



При изменении толщины слоя диэлектрика от 10 до 0,7 мкм получалась емкость, рассчитанная на единицу площади: от 300 до 5000 пф/см²; для опытных конденсаторов с $C_{\text{ном}} = 500$ пф были получены следующие характеристики: $\text{ТКЕ} = +(21 \div 22) \times 10^{-6} \cdot \text{град}^{-1}$; $\text{tg } \delta = 2 \div 3$ до $6 \div 8 \cdot 10^{-4}$; $E_{\text{пр}}$ от 70—90 до 200—400 кв/мм. В сравнении с пленкой SiO_2 , полученной термическим окислением, метод пиролиза дает менее плотную, пористую пленку с большим числом дефектов, снижающих электрическую прочность¹.

Таким образом, среди большого числа опробованных диэлектриков для изготовления тонкослойных конденсаторов пока получили преимущественное применение только два родственных материала: м о н о о к и с ь к р е м н и я SiO как технологически удобный материал, хотя и обладающий относительно невысокими электрическими свойствами, и о к и с ь к р е м н и я SiO_2 — технологически трудный материал, но заманчивый по своим электрическим свойствам. В данной области ведутся интенсивные исследования, а потому можно ожидать как появления новых диэлектриков для создания тонкослойных конденсаторов, так и разработки новых приемов технологии создания тонких слоев.

Глава XII

КОНДЕНСАТОРЫ С ТВЕРДЫМ ОРГАНИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

§ 75. Общая характеристика

Особенностью органических диэлектриков, применяемых в конденсаторостроении, б у м а г и (состоящей из природного высокомолекулярного вещества — клетчатки) и с и н т е т и ч е с к и х п л е н о к (изготавливаемых из неполярных или полярных искус-

¹ По последним данным метод пиролиза использован для получения пленок из нитрида бора BN, позволяющих обеспечить рабочую температуру конденсатора до 600°C (Evalnat. Engug., 1968, 7, № 3, 22).

ственных высокомолекулярных соединений) является возможность получения конденсаторного диэлектрика в виде длинных и очень тонких лент, намотанных в рулоны. При достаточно высоких значениях механической и электрической прочности для бумаги и ряда пленочных диэлектриков можно получать нижний предел толщины, равный 4—5 мм, а используя специальные технологические приемы — получать пленочные диэлектрики толщиной 2—3 мм.

Механическая прочность органических диэлектриков в тонких слоях часто превышает 1000 кг/см^2 , а кратковременная электрическая прочность при нескольких слоях и большой площади обкладок, порядка тысяч квадратных сантиметров, может достигать значений порядка 300 кВ/мм.

Возможность использования малых толщин диэлектрика и высоких значений $E_{\text{раб}}$ даже при небольших значениях ϵ , которые у органических твердых материалов обычно не превышают 3—6, позволяет получать относительно большие значения удельной емкости и удельной энергии конденсаторов с твердым органическим диэлектриком. В связи с этим диапазоном значений $C_{\text{ном}}$ резко расширен по сравнению с конденсаторами, описанными в предыдущей главе; легко получать емкости порядка единиц и десятков микрофарад; если можно использовать конденсаторы с увеличенными размерами, то значения $C_{\text{ном}}$ доходят до сотен микрофарад в одном корпусе. Получение больших емкостей облегчается возможностью механизации процесса изготовления конденсаторных секций путем их намотки из лент диэлектрика и лент металлической фольги (или из металлизированных лент диэлектрика) на специальных станках полуавтоматического или даже автоматического действия.

Бумага и полярные синтетические пленки обладают относительно высокими потерями, а потому изготовленные из них конденсаторы предназначаются в основном для работы при постоянном напряжении или напряжении низкой частоты, или при импульсных напряжениях с небольшой частотой следования импульсов.

Неполярные синтетические пленки имеют малые значения $\text{tg } \delta$ того же порядка, как у неорганических высокочастотных материалов, а потому конденсаторы с таким видом диэлектрика могут использоваться и при высоких частотах. Особенностью неполярных пленок является также необычно высокое удельное сопротивление, достигающее в некоторых случаях до $10^{20} \text{ ом} \cdot \text{см}$, что позволяет получать, используя эти пленки, конденсаторы со столь высокой постоянной времени (до $10^6 \text{ ом} \cdot \text{ф}$), которой нельзя было достичь ранее с другими типами диэлектриков. Конденсаторы с диэлектриком из неполярных пленок обладают также весьма малым коэффициентом абсорбции, что делает их незаменимыми в ряде случаев использования конденсатора в счетно-решающей и измерительно-информационной технике.

Известно, что по нагревостойкости органические материалы уступают неорганическим. Однако даже при использовании пропитанной бумаги можно получать конденсаторы с верхним пределом рабочей температуры до $85-100^{\circ}\text{C}$, а при сниженной рабочей напряженности и до 125°C . Некоторые синтетические пленки с успехом используются в конденсаторах при температурах $125-150^{\circ}\text{C}$, а такой пленочный диэлектрик, как фторопласт-4 (политетрафторэтилен), позволяет изготавливать конденсаторы, пригодные для работы при 200°C . Такого же порядка рабочую температуру дает новая полиимидная пленка. Надо иметь в виду, что при таких температурах обычные сорта стекол и многие виды конденсаторной керамики уже не могут обеспечить надежной работы даже при небольших значениях напряженности электрического поля. Таким образом, физическую нагревостойкость, характеризуемую отсутствием заметных изменений в материале при высокой температуре в отсутствие электрического поля, приходится отличать от нагревостойкости конденсаторного диэлектрика, характеризуемой устойчивостью материала при одновременном воздействии температуры и электрического поля. Можно полагать, что температура 200°C не является предельной для органического материала, а тем более для металлоорганических соединений; вероятно, в будущем химия сумеет разработать для конденсаторостроения и более нагревостойкие материалы этого типа. Однако, когда будет идти разговор о таких предельных рабочих температурах для электрических конденсаторов, как $600-1000^{\circ}\text{C}$, то уже придется ориентироваться на чисто неорганические материалы.

Недостатком органических материалов при их использовании в конденсаторостроении является повышенный коэффициент линейного расширения α_d , который обычно в 10 раз превышает те значения, которые характерны для неорганических диэлектриков. В связи с этим усиливаются деформации диэлектрика при колебаниях температуры, что создает возможность появления остаточных деформаций и связанных с ними заметных необратимых изменений емкости. Поэтому стабильность емкости конденсаторов с органическим твердым диэлектриком, в принципе, всегда будет хуже, чем у лучших типов конденсаторов с неорганическим диэлектриком.

Увеличенные значения α_d и ТКЕ органических материалов обуславливают повышенные значения ТКЕ (§ 9); при использовании полярных органических диэлектриков в определенных интервалах температуры изменение емкости может сильно отклоняться от линейного закона, а также может появляться зависимость емкости от частоты. Тем не менее для некоторых типов пленочных конденсаторов можно получать практически линейную зависимость емкости от температуры с ТКЕ меньшим $100 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ и колебания емкости во времени менее $0,1-0,2\%$; такие конденсаторы уже пригодны для многих областей электроизмерительной техники, в частности, в качестве образцовых конденсаторов большой емкости.

Органическим диэлектрикам свойственно **с т а р е н и е** в электрическом поле, которое может быть как электрохимического, так и ионизационного характера; в связи с этим приходится брать большие запасы электрической прочности и заметно снижать $E_{\text{раб}}$ в сравнении с кратковременным значением $E_{\text{пр}}$, иногда до 8—10 раз. Тем не менее в ряде типов конденсаторов с органическим диэлектриком оказывается возможным применять значения $E_{\text{раб}}$ до 50—60 кВ/мм и даже выше; это позволяет получать конденсаторы с большими запасами энергии и с высокими значениями рабочих напряжений, достигающих нескольких сотен киловольт при технически приемлемых габаритных размерах.

До сего времени **к о н д е н с а т о р н а я б у м а г а** еще продолжает оставаться основным типом твердого диэлектрика в производстве силовых конденсаторов переменного напряжения, а также играет еще значительную роль и в производстве конденсаторов постоянного напряжения для электронной техники. В значительной степени это обусловлено не только удачным сочетанием высоких значений электрической и механической прочности бумаги, но и ее относительной дешевизной и практически неограниченной сырьевой базой, поскольку современная конденсаторная бумага изготавливается из древесной целлюлозы.

В случае необходимости производство этого типа конденсаторного диэлектрика можно относительно быстро расширить во много раз. В частности, в СССР за послевоенные годы выпуск конденсаторной бумаги был увеличен более чем в 10 раз и продолжает расширяться.

В области конденсаторов для электронной техники **с и н т е т и ч е с к и е п л е н к и** являются прежде всего заменителями бумаги в тех случаях, когда ее электрические свойства не могут удовлетворить новым требованиям, предъявляемым к диэлектрику намотанного конденсатора (малый угол потерь, особо высокая постоянная времени, малая абсорбция, высокая стабильность емкости). В этих случаях вместо бумаги применяют обычно неполярные пленки. Некоторые типы полярных пленок (например, полиэтилен-терефталатная пленка), мало отличаясь от бумаги по величине угла потерь, обладают преимуществами в отношении нагревостойкости и электрической прочности, что позволяет улучшить удельные характеристики конденсаторов.

Внедрение такого типа пленок взамен бумаги задерживается их повышенной стоимостью, но при снижении цены на такие пленки, как например в США, они оказываются способными конкурировать с бумагой в технико-экономическом отношении в области конденсаторов для электронной техники. При рабочих температурах 150—200° С бумага уже не пригодна и уступает место нагревостойким пленкам.

Попытки применить синтетические пленки в силовых конденсаторах, работающих при частоте 50 Гц, еще не дали положительных результатов, но, видимо, по мере развития синтетической химии

они будут повторяться¹. Перспективнее использование неполярных пленок в силовых конденсаторах, работающих при средних частотах 1—10 кГц, где применение бумаги требует использования форсированного водяного охлаждения, от которого можно отказаться при пленочной диэлектрике с малыми потерями.

Применение принципа металлизации позволило резко снизить удельный объем, что обеспечило большое развитие производства металлобумажных конденсаторов. Этот же принцип может быть использован и в производстве большинства типов пленочных конденсаторов. Новый тип лакопленочного конденсатора с особо тонким металлизированным диэлектриком позволяет получить удельный объем в 3 раза меньше, чем для лучших образцов металлобумажных конденсаторов.

Так же как и область керамических конденсаторов, область пленочных конденсаторов является весьма перспективной и быстро развивающейся областью конденсаторостроения. Особенно большой прогресс в ней можно ожидать в ближайшие годы в связи с продолжающимся резким расширением производства новых синтетических материалов в нашей стране. В ближайшем будущем можно ожидать появления все новых и новых типов синтетических конденсаторных материалов, так же как в производстве керамических конденсаторов, где продолжают внедряться все новые и новые керамические диэлектрики. Неполярные синтетические пленки позволяют изготавливать высокочастотные конденсаторы с малыми потерями при емкостях порядка 0,001—0,01 мкФ и выше, где высокочастотная керамика уже не может обеспечить достаточно малых размеров и весов. Низкочастотная керамика с высокой ϵ может дать при небольших напряжениях и более высокие значения $C_{ном}$ с приемлемыми удельными характеристиками, но с худшими электрическими параметрами, чем пленочные диэлектрики. При высоких рабочих напряжениях низкой частоты или постоянного тока и значительных емкостях пленочный или пленочнобумажный диэлектрик имеет несомненное преимущество в сравнении с керамикой.

Таким образом, современные конденсаторы с твердым органическим диэлектриком можно разбить на две основные группы: бумажные и пленочные.

А. БУМАЖНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

§ 76. Конденсаторная бумага

Для изготовления бумажных конденсаторов применяют специальную бумагу, отличающуюся весьма малой толщиной, малым содержанием неорганических примесей и выпускаемую с различ-

¹ По последним данным, в США начато производство силовых конденсаторов типа «Магнавар» с комбинированным пленочнобумажным диэлектриком. Разработка аналогичных конденсаторов выполнена в Италии фирмой «Икар».

ным значением плотности. Толщина конденсаторной бумаги составляет от 4—5 до 20—30 *мм*, толщины более 12—15 *мм* применяются теперь редко. При уменьшении толщины бумаги стоимость ее резко возрастает как из-за необходимости увеличивать время размола бумажной массы, что связано с увеличением расхода электроэнергии, так и вследствие уменьшения выхода годной бумаги.

Отечественная бумага выпускается трех сортов по плотности: с объемным весом порядка 1,2 *г/см³* для конденсаторов постоянного напряжения и с объемными весами порядка 1 и 0,8 *г/см³* — для конденсаторов переменного напряжения. Временное сопротивление бумаги разрыву составляет до 1000—1200 *кг/см²* при относительном удлинении 3—5%, пробивная напряженность непропитанной бумаги лежит в пределах от 30—35 до 45—50 *кв/мм* (50 *гц*), возрастая с увеличением плотности и уменьшением толщины (рис. 206, ниже).

Доброкачественная конденсаторная бумага имеет малую воздухопроницаемость (ниже 2—3 *см³/мин*) и малую зольность (0,2—0,3%). Реакция водной вытяжки должна быть слабощелочной и близкой к нейтральной, проводимость водной вытяжки — ниже $3,5 \cdot 10^{-5} \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Бумага должна быть однородной и содержать минимальное количество структурных дефектов. Недостатком бумаги является неизбежное присутствие в ней некото-

рого количества токопроводящих включений (ТПВ) в виде частиц угля, а также железа и меди или их окислов. В случае тонкой конденсаторной бумаги размеры этих частиц могут быть соизмеримы с толщиной бумаги, т. е. они могут давать сквозное короткое замыкание листа. ГОСТ 1908—66 регламентирует допускаемое количество ТПВ в зависимости от толщины и плотности бумаги (рис. 199); определение числа ТПВ на 1 *м²* производится пропусканием бумажной ленты между двумя валиками: металлическим и покрытым проводящей резиной, к которым подведено небольшое напряжение и подключен электрический счетчик, учитывающий число коротких замыканий.

Наличие ТПВ не позволяет при обкладках из фольги использовать менее двух слоев бумаги между обкладками конденсатора. При больших значениях емкости, т. е. при большей площади обкладок, даже при двух слоях бумаги имеется вероятность совпадения

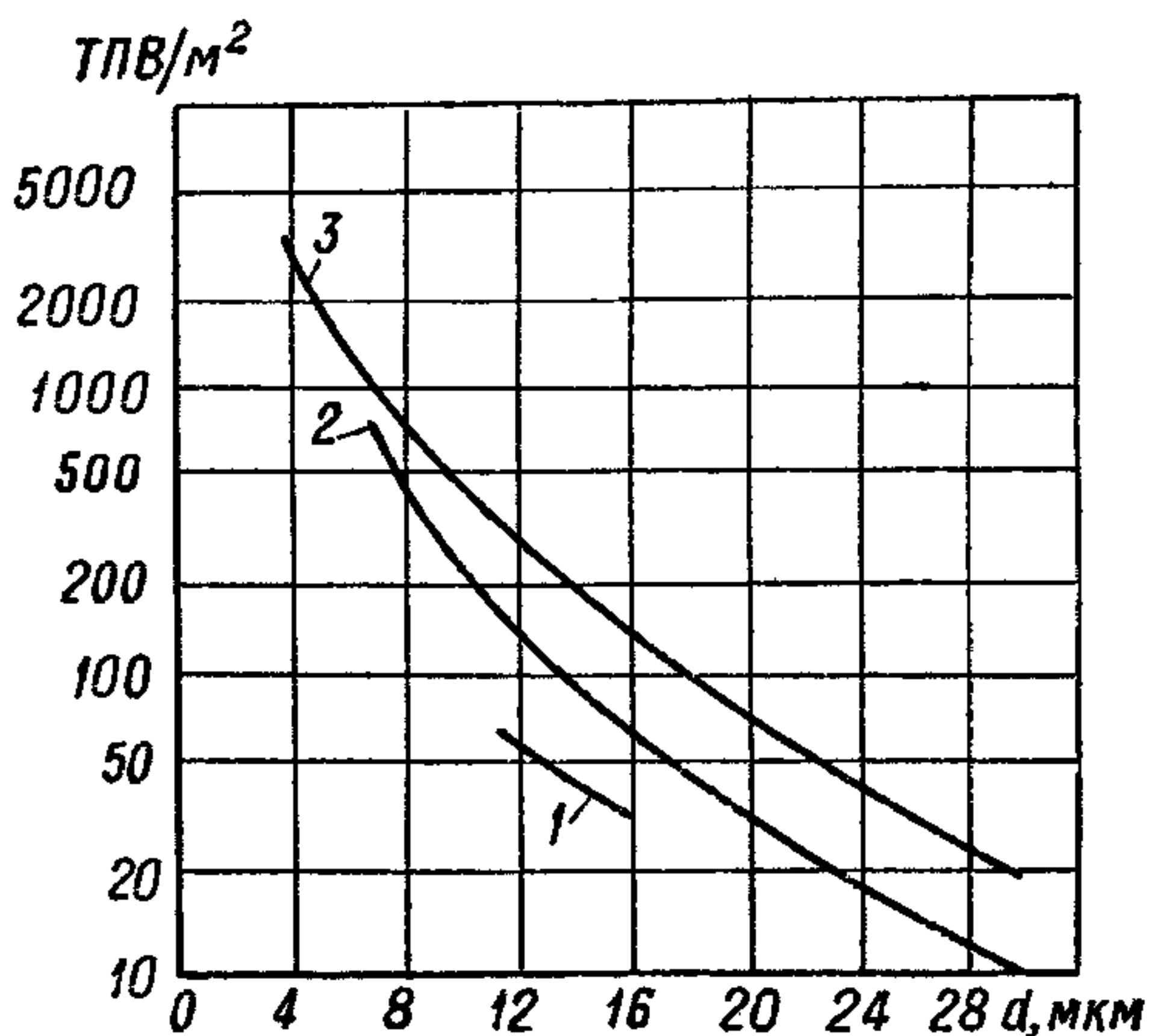


Рис. 199. Зависимость допускаемого содержания ТПВ на 1 *м²* конденсаторной бумаги, по ГОСТ 1908—66.

1 — 0,8 *г/см³*; 2 — 1,0 *г/см³*; 3 — 1,17—1,21 *г/см³*.

двух ТПВ в одном и том же участке слоев; поэтому, если нужна повышенная надежность, то рекомендуется брать не менее трех слоев.

Основным типом сырья для изготовления конденсаторной бумаги является сульфатная древесная целлюлоза (крафт-целлюлоза), полученная обработкой древесной щепы (сосновой) для удаления лигнина; содержание лигнина в исходной древесине доходит до 25—30% и резко снижает нагревостойкость древесного волокна. Основным веществом, входящим в состав сульфатной целлюлозы, является собственно клетчатка (альфа-целлюлоза); содержание ее в обычной отечественной сульфатной целлюлозе около 85—88%.

Альфа-целлюлоза представляет собой природное высокомолекулярное вещество, относящееся к классу углеводов; состав его может быть выражен формулой $(C_6H_{10}O_5)_n$. Полимерная молекула этого вещества имеет вид длинной цепочки, составленной из глюкозных колец, связанных кислородными мостиками (рис. 200, а); число таких колец в одной молекуле (степень полимеризации) велико и может превышать 1000. Упрощенная структурная схема такой молекулы показана на рис. 200, б. Следующим компонентом в составе древесной целлюлозы являются гемицеллюлозы — низкомолекулярные углеводы (степень полимеризации порядка нескольких десятков), которые могут располагаться между цепями альфа-целлюлозы или входить в эти цепи в виде составного звена. Содержание гемицеллюлоз доходит до 9—12%. Различают три типа гемицеллюлоз: гексозаны, пентозаны и уроновые кислоты (рис. 200, в, г, д). Основным из них являются пентозаны, количеством которых обычно характеризуют содержание гемицеллюлоз в древесной целлюлозе.

В состав древесной целлюлозы входит также остаточный лигнин в количестве 3—3,5%. Он представляет собой сложное органическое соединение, содержащее фенольные группы и резко отличное от углеводов. Можно полагать, что небольшое содержание лигнина в конденсаторной бумаге благоприятно сказывается на ее нагревостойкости, так как лигнин может играть роль антиокислителя. Было доказано, что применявшаяся раньше в конденсаторостроении тряпичная бумага, в которой содержание лигнина не превышало 0,5%, имела заметно пониженную нагревостойкость в сравнении с современной бумагой, изготовленной из древесной целлюлозы с указанным выше содержанием лигнина.

В сульфатной целлюлозе содержится около 0,5% смол и других органических растворимых веществ, а также порядка 0,3% золы, т. е. неорганических веществ. Зола состоит из окислов кремния, алюминия, кальция, магния, натрия и других металлов. Часть металлов, содержащихся в золе, может непосредственно удерживаться молекулами целлюлозы в виде катионов за счет ионнообменных реакций.

Как показано на рис. 200, каждое глюкозное кольцо молекулы альфа-целлюлозы содержит три гидроксильные группы —ОН. Их наличие

объясняет полярность целлюлозы, так как эти полярные группы могут смещаться по отношению к основной цепи под воздействием электрического поля. В связи с этим для бумаги наблюдается характерный дипольный максимум угла потерь в

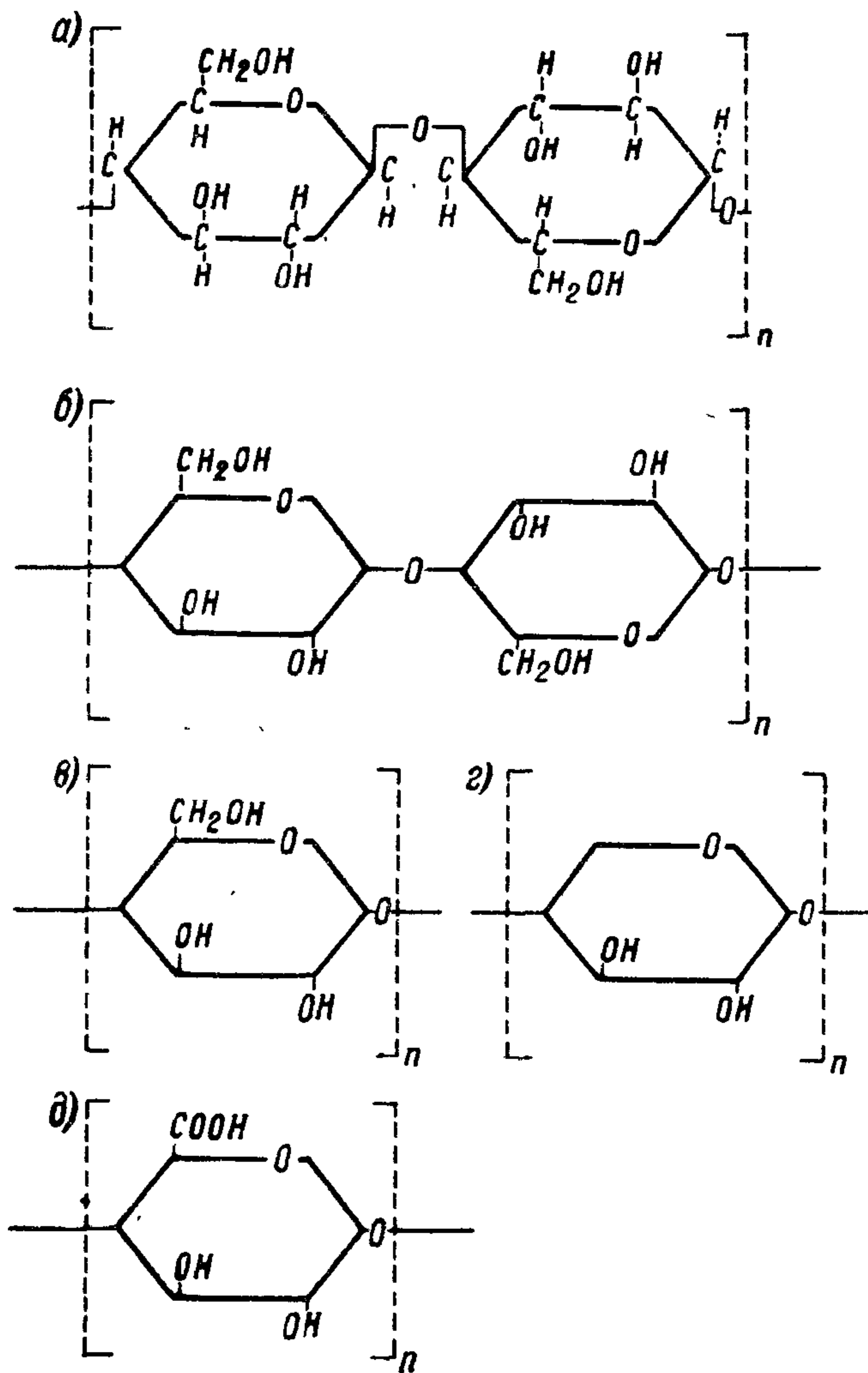


Рис. 200. Структура молекулы альфа-целлюлозы (а, б) и гемицеллюлоз (в, г, д); в — гексозан; г — пентозан; д — уроновая кислота.

области низких температур, и происходит снижение ϵ (а следовательно, и емкости) в этой температурной области (рис. 201). У пентозанов количество гидроксильных групп меньше и их полярность ослаблена в сравнении с альфа-целлюлозой. Далее описанный здесь сложный комплекс веществ, образующих стенки растительных

волокон, из которых построена конденсаторная бумага, мы будем называть клетчаткой в отличие от собственно клетчатки, для которой мы используем термин альфа-целлюлоза.

Мы имеем дело с клетчаткой в волокнистом состоянии, когда отдельные структурные элементы этого вещества разобщены порами, заполненными воздухом, наличие которого затрудняет измерение электрических свойств клетчатки. Однако, пользуясь косвенными методами, удалось установить, что клетчатка имеет $\epsilon_k \approx 6,6$ и $\operatorname{tg} \delta_k \approx 60 \div 70 \cdot 10^{-4}$ при 20°C и частоте 50 гц. При дипольном максимуме $\operatorname{tg} \delta_k$ возрастает примерно в 10 раз. Д. С. Варшавский показал, что величина $\operatorname{tg} \delta_k$ клетчатки зависит от остаточного дав-

ления, которое достигается при сушке бумаги:

$$\operatorname{tg} \delta_k = 50 \cdot 10^{-4} + 15 \cdot 10^{-4} \lg(p \cdot 10^3), \quad (265)$$

где p — остаточное давление в мм рт. ст. Согласно этой формуле, указанные выше значения $\operatorname{tg} \delta_k$ соответствуют сушке при остаточном давлении порядка 10^{-2} мм рт. ст.

Наличие гидроксильных, притягивающих полярные молекулы воды, объясняет высокую гигроскопичность бумаги, как и других целлюлозных материалов, способных поглощать большие количества воды из окружающего воздуха. Эта

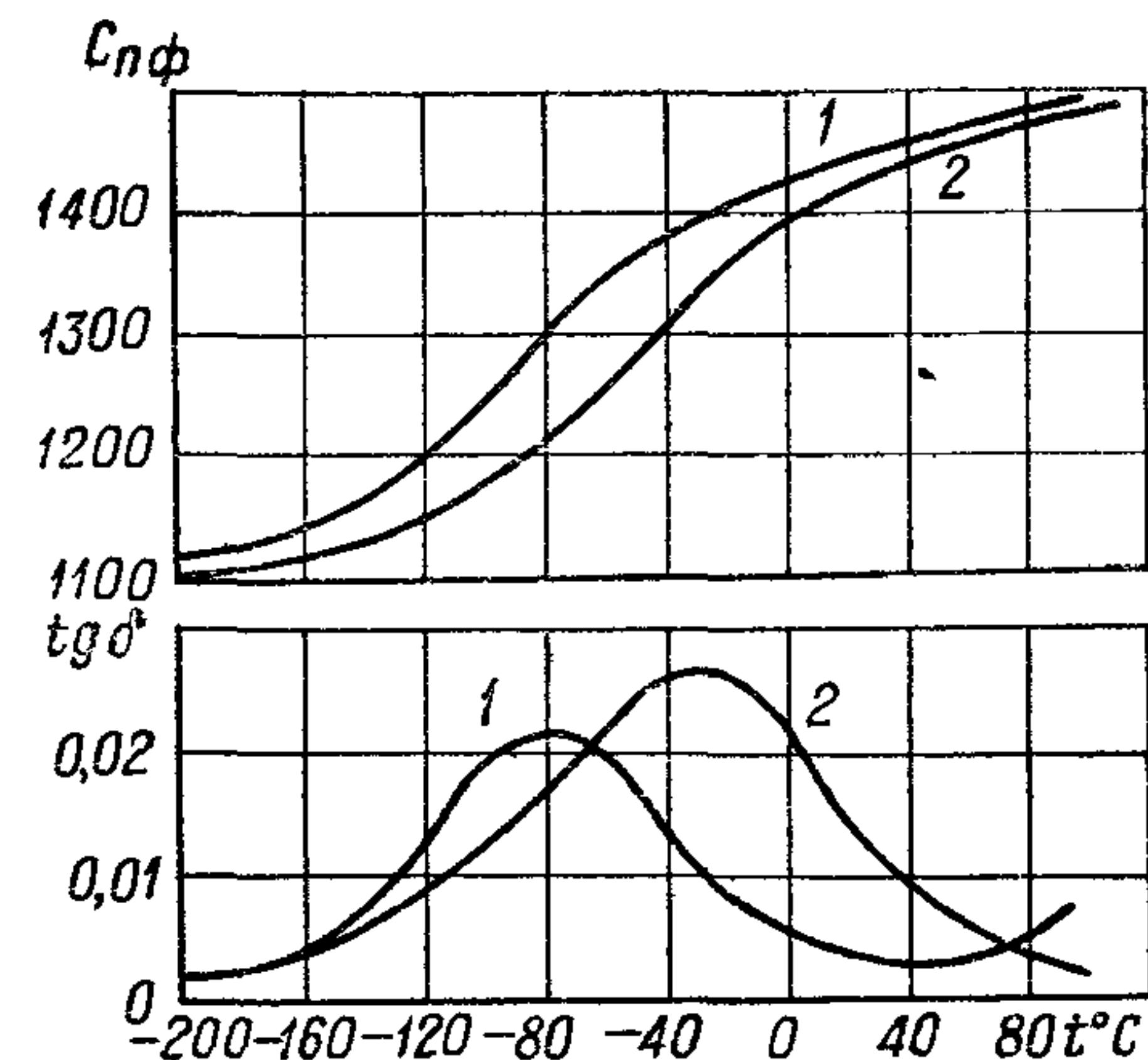


Рис. 201. Зависимость емкости и угла потерь образца сухой бумаги от температуры при двух частотах:

1 — 1 кГц; 2 — 100 кГц.

особенность заставляет уделять большое внимание вопросам влагозащиты в производстве бумажных конденсаторов.

Непропитанная конденсаторная бумага в воздушно-сухом состоянии содержит 20—50% воздуха (по объему) и 6—10% воды (по весу). Для улучшения ее электрических свойств необходимо проводить сушку — для удаления воды и пропитку — для замены воздуха, находящегося в порах бумаги, твердым или жидким диэлектриком, обладающим более высокими, чем у воздуха, значениями ϵ и $E_{\text{пр}}$. Операции сушки и пропитки проводят после намотки конденсаторных секций (обычно после сборки намотанных секций в корпусах).

Изучение структуры конденсаторной бумаги позволяет прийти к выводу, что по толщине бумажной ленты происходит последовательное чередование слоев клетчатки (степок волокна) и разделяющих их пор, расположенных параллельно плоскости бумажного листа; в непропитанной бумаге эти поры заполнены воздухом, а в готовом конденсаторе — пропиточной массой. Для исследова-

ния такой системы (рис. 202, а) можно применить последовательную эквивалентную схему (рис. 202, б), в которой емкость C_K соответствует поляризации клетчатки, а емкость C_{Π} — поляризации вещества, заполняющего поры. Используя формулу (16) для последовательного соединения двух емкостей, получаем:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_K} + \frac{1}{C_{\Pi}} \quad \text{и} \quad C = \frac{C_K C_{\Pi}}{C_K + C_{\Pi}}.$$

Используя формулу (2) и принимая толщины слоев клетчатки и пор соответственно равными $d_K = d(1-x)$ и $d_{\Pi} = dx$, где d — суммарная толщина бумаги, а x — относительный объем пор в бумаге, находим:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\frac{\varepsilon_K}{1-x} \frac{\varepsilon_{\Pi}}{x}}{\frac{\varepsilon_K}{1-x} + \frac{\varepsilon_{\Pi}}{x}} = \frac{\varepsilon_K \varepsilon_{\Pi}}{(1-x) \varepsilon_{\Pi} + x \varepsilon_K} = \\ &= \frac{\varepsilon_K}{1-x + x \frac{\varepsilon_K}{\varepsilon_{\Pi}}}. \end{aligned} \quad (266)$$

Величину x можно найти, зная плотность бумаги γ и плотность клетчатки γ_K , для которой установлено значение $1,55 \text{ г/см}^3$:

$$x = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_K}. \quad (267)$$

Для сухой непропитанной бумаги можно принять в формуле (266) $\varepsilon_{\Pi} = 1$, поскольку в порах находится воздух. Тогда

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_K}{1 + x(\varepsilon_K - 1)}. \quad (268)$$

При $\gamma = 0,8 \text{ г/см}^3$ имеем $x = 0,49$ и $\varepsilon \approx 1,8$; при $\gamma = 1 \text{ г/см}^3$ имеем $x = 0,35$ и $\varepsilon \approx 2,2$; при $\gamma = 1,2 \text{ г/см}^3$ имеем $x = 0,22$ и $\varepsilon \approx 2,9$. Таким образом, непропитанная бумага имеет ε значительно ниже, чем клетчатка, за счет последовательного включения слоев воздуха, заполняющего поры.

В случае пропитанной бумаги $\varepsilon_{\Pi} > 1$ и, согласно формуле (266), ε должна возрастать с увеличением ε_{Π} , но не линейно, а постепенно замедляясь (рис. 203). В пределе при стремлении ε_{Π} к бесконечности величина ε пропитанной бумаги стремится к некоторому конечному значению:

$$\lim_{\varepsilon_{\Pi} \rightarrow \infty} \varepsilon = \frac{\varepsilon_K}{1-x}.$$

Для бумаги с плотностью $0,8 \text{ г/см}^3$ это предельное значение составляет 12,8, при $\gamma = 1,0 \text{ г/см}^3$ равно 10 и при $\gamma = 1,2 \text{ г/см}^3$ —

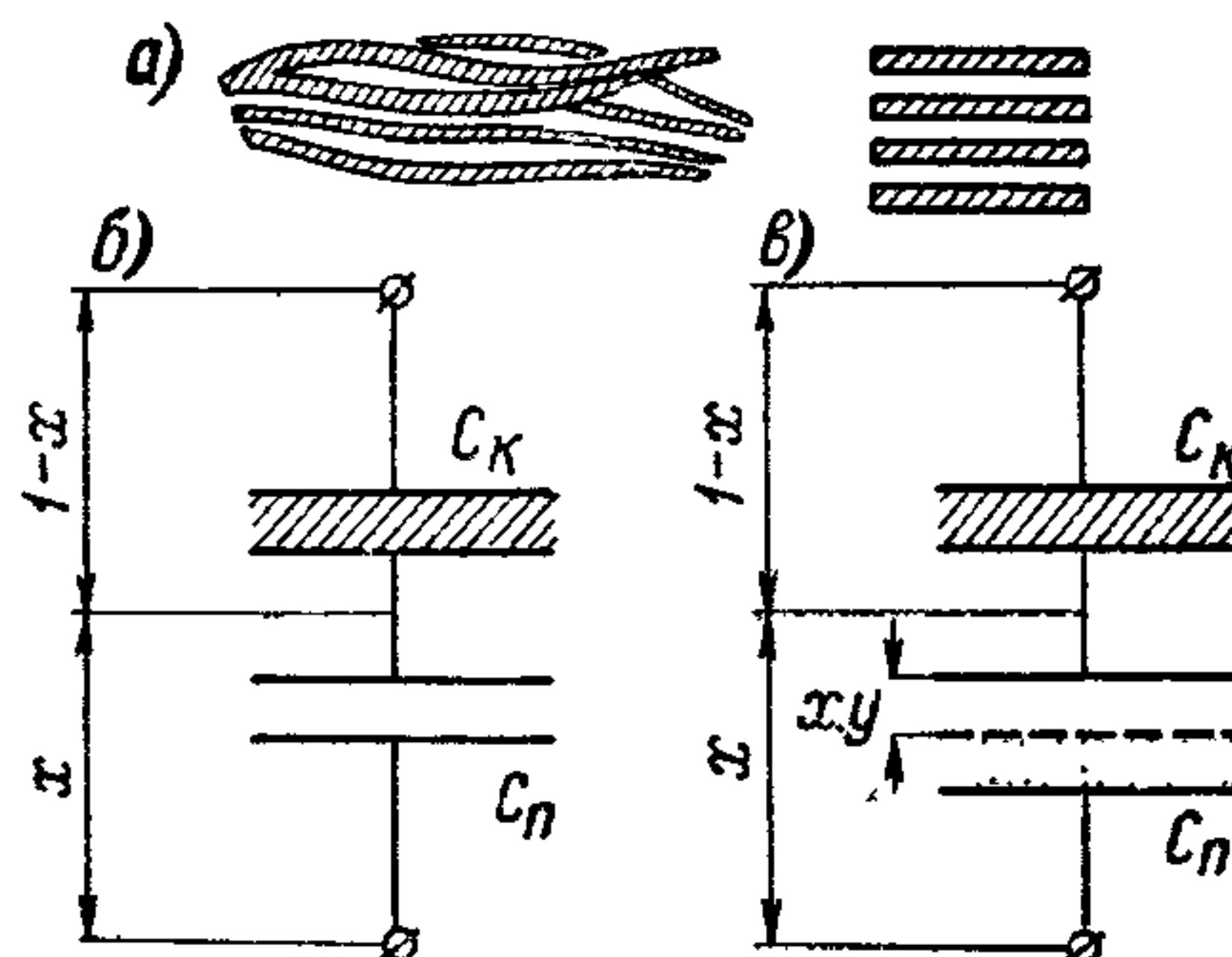


Рис. 202. Последовательная эквивалентная схема для конденсаторной бумаги: а — схема структуры бумаги; б — схема для пропитки жидким диэлектриком; в — схема для пропитки твердым диэлектриком с объемной усадкой y .

около 8,3. Значения такого порядка были получены при пропитке конденсаторной бумаги полупроводящей жидкостью: смесью трикрезилфосфата с крезолом при удельном сопротивлении смеси порядка $2 \div 3 \cdot 10^7 \text{ ом} \cdot \text{см}$ (в этом случае можно было принять $\epsilon_{\Pi} = \infty$).

Формула (266) соответствует полному заполнению всех пор бумаги пропитывающим веществом, т. е. пропитке бумаги жидким диэлектриком при достаточно высоком вакууме. При пропитке твердыми веществами, которые дают усадку при отвердевании, часть пор остается не заполненной пропиточной массой (рис. 202, в),

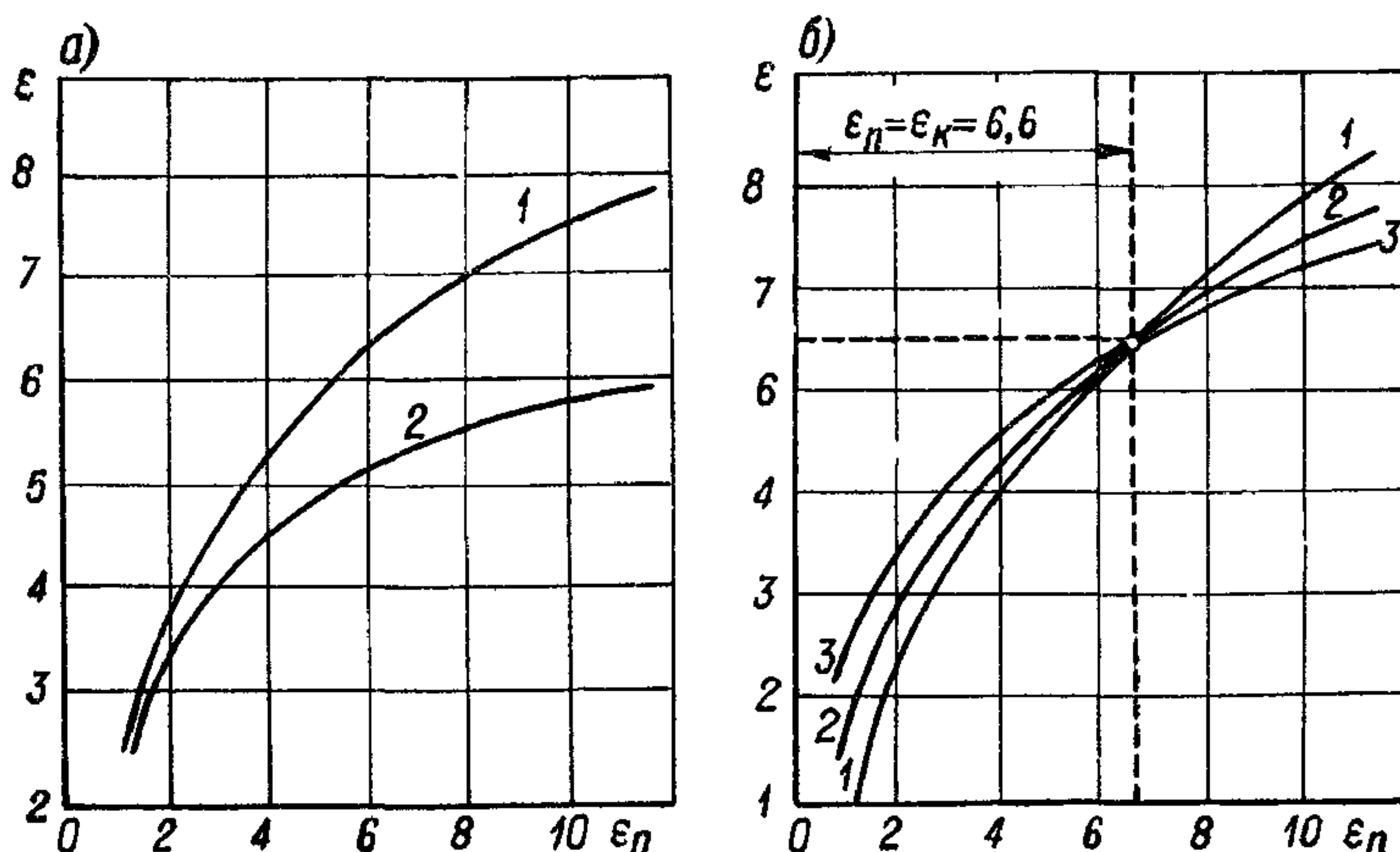


Рис. 203. Зависимость диэлектрической проницаемости пропитанной бумаги от диэлектрической проницаемости пропиточной массы: а — бумага плотностью 1 г/см^3 .

1 — пропитка жидкой массой; 2 — пропитка твердой воскообразной массой;

б — бумага разной плотности, пропитка жидкой массой.

1 — $0,8 \text{ г/см}^3$; 2 — $1,0 \text{ г/см}^3$; 3 — $1,2 \text{ г/см}^3$.

что приводит к снижению ϵ пропитанной бумаги. Если обозначить относительную объемную усадку через y , то для эквивалентной схемы рис. 202, в можно написать выражение

$$\epsilon = \frac{\epsilon_K}{x(1-y)\frac{\epsilon_K}{\epsilon_{\Pi}} + x(y\epsilon_K - 1) + 1}. \quad (269)$$

Используя это выражение, можно получить нижнюю кривую на рис. 203, а, которая соответствует пропитке воскообразными массами, для которых $y \approx 0,10$. Кривые рис. 203, а соответствуют бумаге средней плотности: $\gamma \approx 1 \text{ г/см}^3$. В этом случае при усадке 10% и при $\epsilon_{\Pi} \approx 2$ (неполярные массы) выигрыш в емкости при переходе от твердой пропитки к жидкой составляет 10—12%, при больших значениях ϵ_{Π} выигрыш дополнительно увеличивается. Если совместить на одном рисунке кривые $\epsilon = f(\epsilon_{\Pi})$ при различ-

ных значениях плотности бумаги, то все они пересекутся в точке, соответствующей $\varepsilon_{\Pi} = \varepsilon_K = 6,6$ (рис. 203, б). При $\varepsilon_{\Pi} < \varepsilon_K$ увеличение плотности бумаги повышает ее ε в пропитанном виде, т. е. емкость конденсатора, а при $\varepsilon_{\Pi} > \varepsilon_K$, наоборот, понижает. Поскольку обычные пропиточные массы имеют $\varepsilon_{\Pi} < 6,6$, применение более плотной бумаги выгоднее с точки зрения повышения емкости. Особенно это заметно при пропитке неполярными массами, например нефтяным маслом.

Используя эквивалентную схему рис. 202, б, можно легко найти выражение, связывающее угол потерь конденсаторной бумаги с величиной угла потерь клетчатки и вещества, заполняющего поры в бумаге. Согласно формуле (119), получаем:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_K}{1 + \frac{x\varepsilon_K}{(1-x)\varepsilon_{\Pi}}} + \frac{\operatorname{tg} \delta_{\Pi}}{1 + \frac{(1-x)\varepsilon_{\Pi}}{x\varepsilon_K}}. \quad (270)$$

Для сухой непропитанной бумаги можно принять $\varepsilon_{\Pi} = 1$ и $\operatorname{tg} \delta_{\Pi} \approx 0$. Тогда получим:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{tg} \delta_K}{1 + \frac{x\varepsilon_K}{1-x}}. \quad (271)$$

Формула (271) показывает, что при увеличении x , при снижении плотности бумаги γ , следует ожидать снижения угла потерь. Это подтверждает и опыт (рис. 204, а). Согласно ГОСТ 1908 — 66, при частоте 50 гц и температуре 60° С $\operatorname{tg} \delta$ не должен превышать $13 \cdot 10^{-4}$ при $\gamma = 0,8 \text{ Г/см}^3$, $17 \cdot 10^{-4}$ при $\gamma = 1 \text{ Г/см}^3$ и $20 \cdot 10^{-4}$ при $\gamma = 1,2 \text{ Г/см}^3$; при температуре 100° С эти цифры соответственно увеличиваются до $25 \cdot 10^{-4}$, $35 \cdot 10^{-4}$ и $40 \cdot 10^{-4}$. Следует добиваться улучшения этого показателя, так как ряд зарубежных фирм дает лучшие результаты.

При пропитке бумаги хорошо очищенной и высушенной пропиточной массой величина $\operatorname{tg} \delta_{\Pi} \approx 1 \div 2 \cdot 10^{-4}$, т. е. много ниже указанных ранее значений $\operatorname{tg} \delta_K$. В связи с этим вторым членом в уравнении (270) можно пренебречь, если температура невелика. Однако, даже если мы положим $\operatorname{tg} \delta_{\Pi} = 0$, в оставшийся первый член войдет величина $\varepsilon_{\Pi} > 1$, что повлечет за собой увеличение величины $\operatorname{tg} \delta$ в сравнении с непропитанным состоянием, характеризуемым формулой (271). Физически это означает, что при увеличении емкости пор за счет пропитки увеличивается доля напряжения, приходящаяся на слои клетчатки, представляющие собой сильно полярный компонент с увеличенными потерями; при этом угол потерь всей системы в целом должен возрасти.

Если пропитка ведется полярной массой с увеличенной ε_{Π} , то $\operatorname{tg} \delta$ пропитанной бумаги будет еще больше (рис. 204, б). Поэтому в связи с переходом от ранее применявшейся повсеместно пропитки силовых бумажных конденсаторов неполярным нефтяным маслом

(ϵ_n порядка 2) к пропитке полярными хлордифенилами (ϵ_n порядка 5) угол потерь конденсаторов заметно увеличился; чтобы уменьшить его и тем снизить перегрев конденсатора, оказалось необходимым снизить потери в самой бумаге за счет снижения ее плотности. Поэтому наряду с применявшимися ранее значениями плотности 1,2 и 1 $\Gamma/\text{см}^3$ начала применяться бумага с плотностью 0,8 $\Gamma/\text{см}^3$. Следует отметить, что на рис. 204, б для пропитанной бумаги величина $\text{tg } \delta$ при повышенных температурах должна на-

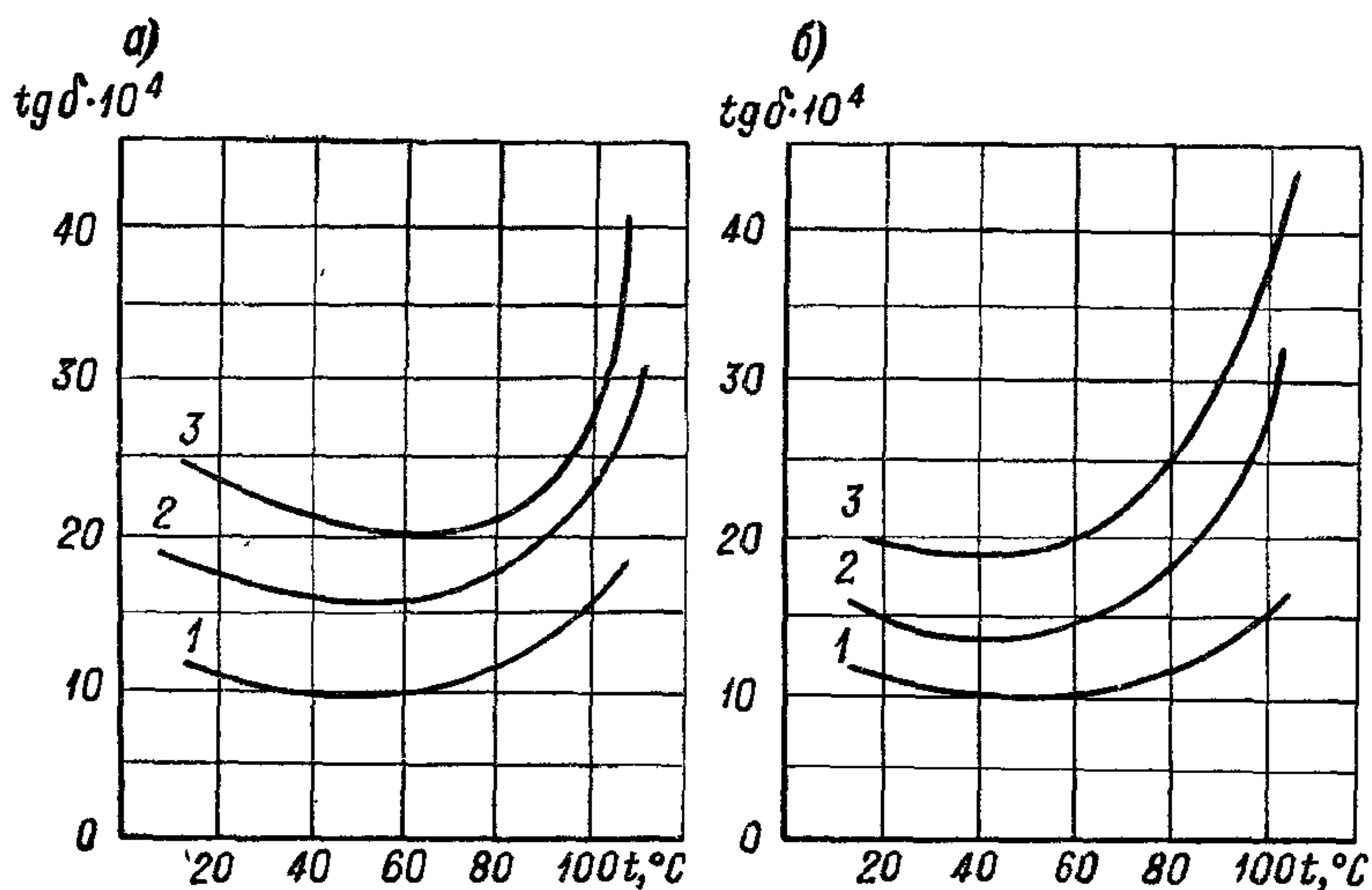


Рис. 204. Зависимость угла потерь конденсаторной бумаги от температуры при частоте 50 гц: а — влияние плотности на угол потерь сухой бумаги.

1 — 0,9 $\Gamma/\text{см}^3$; 2 — 1,15 $\Gamma/\text{см}^3$; 3 — 1,24 $\Gamma/\text{см}^3$;

б — влияние диэлектрической проницаемости вещества, заполняющего поры в бумаге, на ее угол потерь.

1 — непропитанная бумага ($\epsilon = 1$); 2 — бумага, пропитанная маслом ($\epsilon = 2$); 3 — бумага, пропитанная хлорированным дифенилом ($\epsilon = 5$).

растать быстрее, чем для непропитанной бумаги. Это следует объяснить тем, что при увеличении температуры возрастает $\text{tg } \delta_n$ и, начиная с некоторого значения температуры, мы уже не можем пренебрегать вторым членом в уравнении (270).

Для снижения угла потерь бумаги следует применять при ее изготовлении полностью о б е с с о л е н н у ю в о д у, лишенную как катионов, так и анионов. Особенно опасны одновалентные катионы Na^+ и анионы Cl^- . Большое внимание уделяется также в последнее время вопросу получения о б л а г о р о ж е н н о й ц е л л ю л о з ы, содержащей пониженное количество пентозанов, т. е. увеличенное количество альфа-целлюлозы. Однако чрезмерное облагораживание может привести к повышению $\text{tg } \delta$ в области высоких температур (рис. 205, а). Влияние улучшения качества бумаги на снижение угла потерь американских бумажных конден-

саторов, пропитанных хлорированным дифенилом, показано на рис. 205, б.

Рассмотренные выше формулы (266), (269), (270) можно распространить и на готовые бумажные конденсаторы, однако в этом случае значения ϵ надо уменьшать на 10—15%, чтобы учесть наличие зазоров, заполненных пропиточной массой, между слоями бумаги и между бумагой и фольговыми обкладками. Уточненные формулы с учетом коэффициента запрессовки (отношение номинальной толщины диэлектрика к фактической толщине с учетом зазоров при заданной степени сжатия конденса-

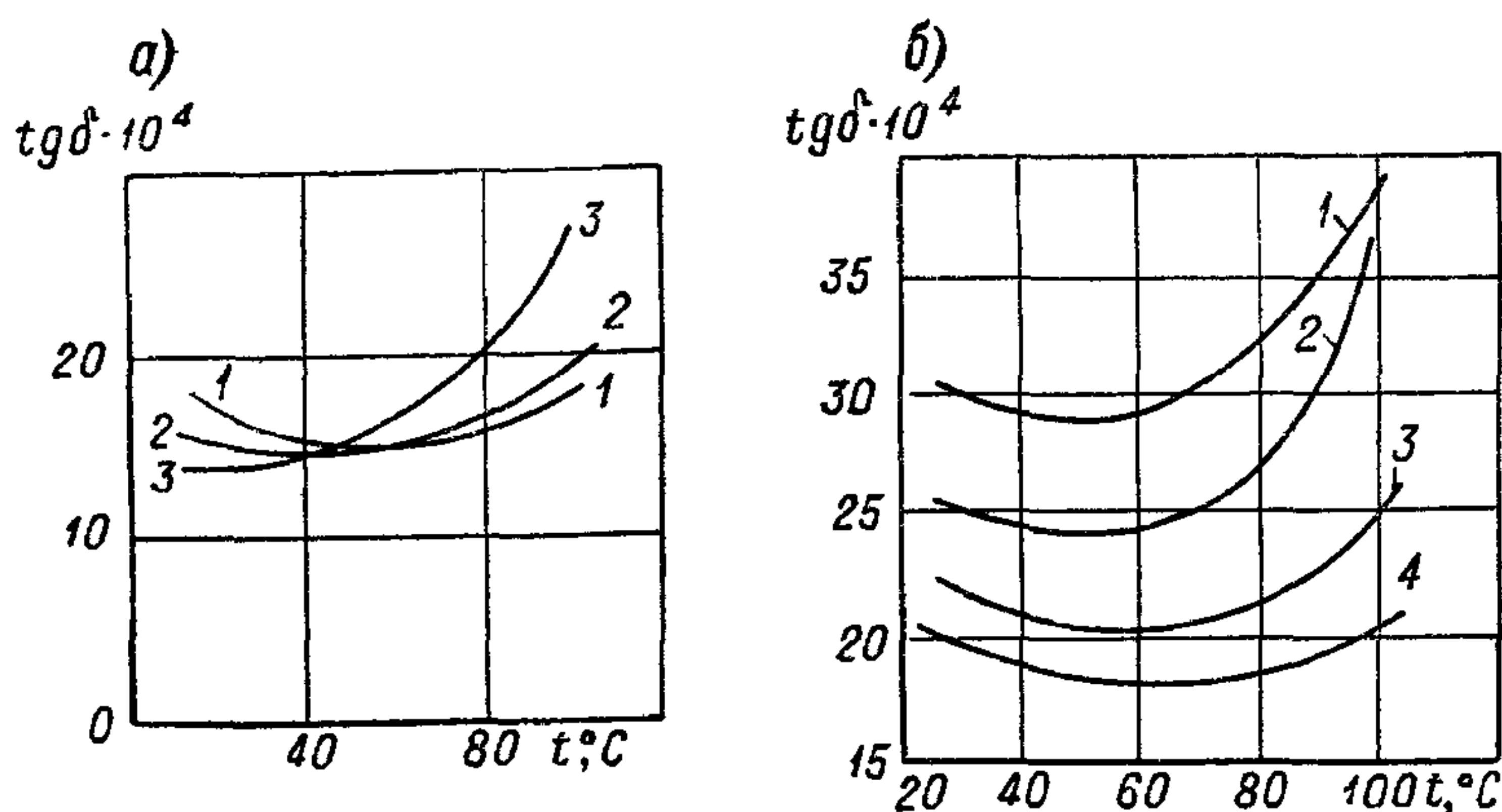


Рис. 205. Зависимость угла потерь от температуры: а — образцы непропитанной бумаги с различным содержанием альфа-целлюлозы:

1 — 89%; 2 — 94%; 3 — 99%;

б — конденсаторы, пропитанные хлордифенилом.

1 — бумага «крафт», 1940 г.; 2 — бумага «модифицированная крафт», 1943—1955 гг.; 3 — бумага «Лоу-лосс крафт», 1955—1958 гг.; 4 — бумага «изокрафт», 1958—1963 гг.

торной секции) были предложены Ю. В. Багалеом и Д. С. Варшавским.

Исходя из последовательной эквивалентной схемы, можно представить, что пробой конденсаторной бумаги должен происходить последовательно в две стадии: сначала бо́льшая часть напряжения (при переменном токе) прикладывается к меньшей емкости пор C_n , заполненных газом (для непропитанной бумаги) или пропиточной массой; происходит пробой газообразной или жидкой фазы, заполняющей поры, после чего все напряжение прикладывается к емкости C_k , т. е. к слоям клетчатки, которые также при этом пробиваются. Основываясь на этом предположении, можно получить следующее выражение для электрической прочности конденсаторной бумаги:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр.п}}}{d} \left[1 + \frac{\epsilon_n \gamma}{\epsilon_k (\gamma_k - \gamma)} \right], \quad (272)$$

где d — толщина бумаги в мкм , а $U_{\text{пр.п}}$ — пробивное напряжение вещества, заполняющего поры, в в . Значение $U_{\text{пр.п}}$ соответствует пробое при переменном напряжении газовых или жидких прослоек толщиной порядка нескольких микрон. Для воздуха при $d < 7 \div 8 \text{ мкм}$ можно принять $U_{\text{пр.п}}$ равным 250 в (эфф.). Подставив это значение в формулу (272) и положив $\epsilon_{\text{п}} = 1$, получаем возможность вычислить приближенное значение $E_{\text{пр}}$ для непропитанной, конденсаторной бумаги. Результат такого вычисления сравнивается с опытом на рис. 206. Как и вытекает из формулы (272), с ростом плотности бумаги ее электрическая прочность растет, а с увеличением толщины — падает.

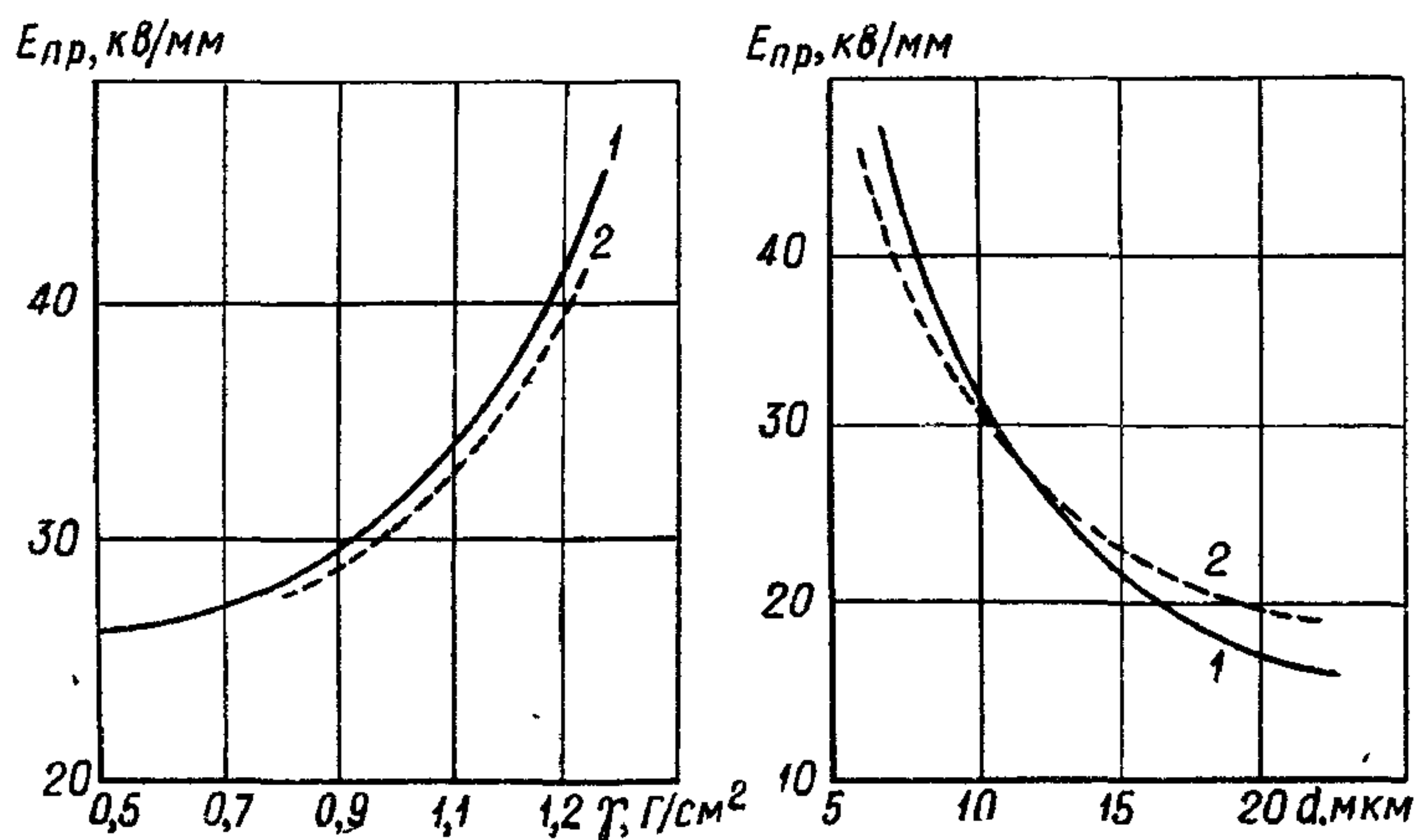


Рис. 206. Зависимость электрической прочности сухой непропитанной конденсаторной бумаги от ее плотности (слева) и от толщины (справа).

1 — опыт; 2 — расчет.

После пропитки электрическая прочность бумаги возрастает прежде всего потому, что при замене воздуха жидкостью должно увеличиться значение $U_{\text{пр.п}}$; кроме того, возрастает и второй член в скобках в формуле (272), так как $\epsilon_{\text{п}} > 1$. Увеличение $\epsilon_{\text{п}}$ дает улучшение однородности распределения напряжения между порами и клетчаткой, что способствует повышению электрической прочности. Поэтому переход к пропитке полярными жидкостями должен давать увеличение $E_{\text{пр}}$ при условии, что $U_{\text{пр.п}}$ сохраняется на прежнем уровне.

В случае постоянного напряжения распределение напряжения между слоями клетчатки и пропиточной массой в порах бумаги будет определяться значениями проводимостей, а не величинами $\epsilon_{\text{к}}$ и $\epsilon_{\text{п}}$. Проводимость пропиточных масс, особенно жидких, обычно выше проводимости клетчатки (при 20°С для сухой клетчатки можно ожидать $\rho_{\text{об}} \approx 10^{17} - 10^{18} \text{ ом} \cdot \text{см}$); поэтому при постоянном токе основная доля напряжения, по-видимому, приходится уже не на пропиточную массу, а на стенки волокна, т. е. на клет-

чатку. Действительно, при изучении зависимости $E_{\text{пр}}$ пропитанной бумаги от давления оказалось, что при переменном напряжении $E_{\text{пр}}$ возрастает с ростом давления в соответствии с упрочнением жидкого диэлектрика при увеличении давления (если он не идеально обезгажен), тогда как при постоянном напряжении $E_{\text{пр}}$ не зависит от давления в соответствии с отсутствием такой зависимости для твердых диэлектриков, к которым относится и клетчатка.

Влияние плотности бумаги на характер зависимости $E_{\text{пр}}$ бумажных конденсаторов от времени показано схематически на рис. 207. При постоянном токе бумага с большей плотностью сохраняет свое преимущество перед бумагой с меньшей плотностью как при

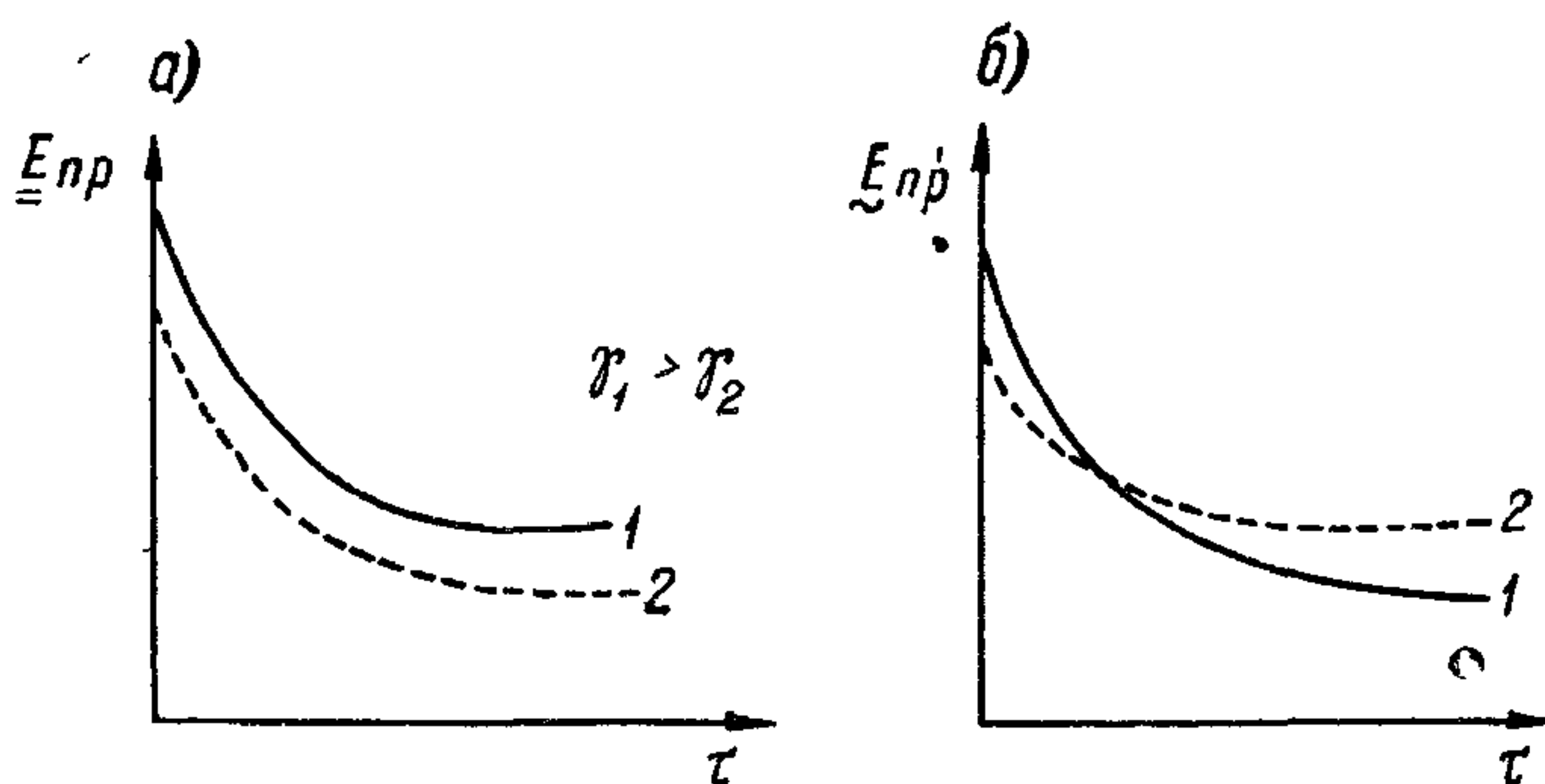


Рис. 207. Влияние плотности бумаги на характер зависимости электрической прочности бумажного конденсатора от времени воздействия постоянного (а) и переменного (б) напряжения; бумага 1 имеет выше плотность, чем бумага 2.

кратковременном, так и при длительном воздействии напряжения; при переменном токе преимущество более плотной бумаги сохраняется лишь при кратковременном действии напряжения, а при длительном воздействии большую электрическую прочность дает менее плотная бумага. Это объясняется как тем, что благодаря ее меньшим потерям снижается перегрев конденсатора, что должно замедлять старение, так и тем, что ионизационные процессы в диэлектрике конденсатора развиваются медленнее при снижении плотности бумаги, так как облегчается рассасывание газов, выделяющихся при этих процессах. Практически бумага с плотностью $1,2 \text{ г/см}^3$ предназначена поэтому для работы при постоянном напряжении, а бумага плотностью $1,0 \text{ г/см}^3$ и $0,8 \text{ г/см}^3$ — при переменном напряжении, причем первая из них — при пропитке нефтяным маслом, а вторая — при пропитке полярными хлорированными жидкостями. Для постоянного напряжения желательно даже иметь бумагу с еще большей плотностью порядка $1,3 \text{ г/см}^3$, которая может дать дополнительное повышение $E_{\text{пр}}$; увеличение потерь у такой бумаги при постоянном напряжении неопасно.

Представляет большой интерес установить связь между основными характеристиками конденсаторной бумаги и ее поведением в конденсаторах при длительной работе. Первую попытку получить такую связь провел Л. М. Вайсман, который предложил формулу для вычисления срока службы бумажных двухслойных конденсаторов при их ускоренных испытаниях при постоянном напряжении, которая дала удовлетворительное совпадение с опытными данными:

$$\tau = A \left[\left(\frac{E}{K \cdot 10^{-5} W^{1/3}} \right)^{1/2} + B \right], \quad (273)$$

где E — среднее значение пробивной напряженности непропитанной бумаги в $кв/мм$, W — воздухопроницаемость бумаги в $мл/мин$, A, B — постоянные, связанные с конструкцией конденсаторов, K — постоянная, входящая в формулу, определяющую зависимость N — числа ТПВ на $1 м^2$ от плотности бумаги γ и толщины ее d :

$$N = K \left(\frac{\gamma}{d} \right)^3. \quad (274)$$

Здесь γ — в $г/см^3$ и d — в $мм$.

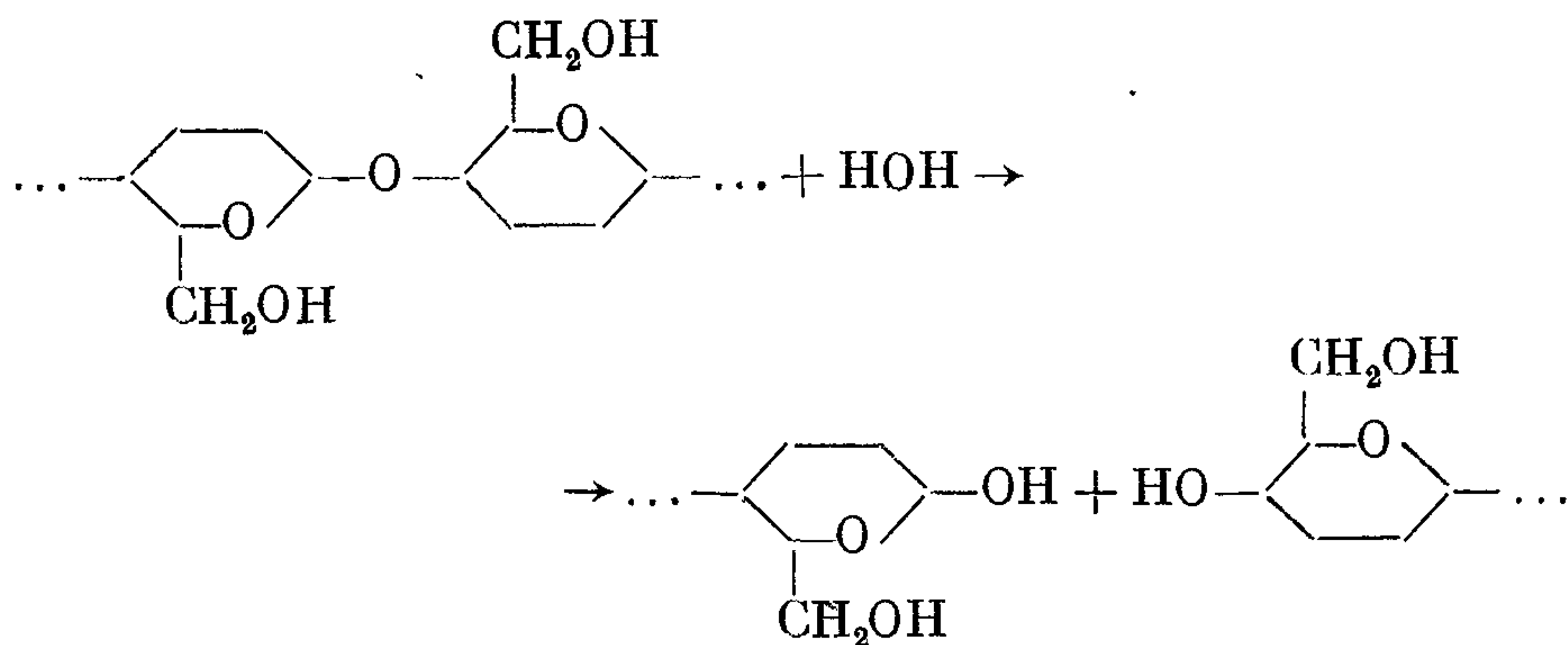
Эта формула еще нуждается в дополнительных уточнениях и проверке. В частности, Л. М. Вайсман предложил ввести в формулу дополнительный член, учитывающий нагревостойкость бумаги по потере ее сопротивления продавливанию при длительном нагреве.

Основным типом конденсаторной бумаги, применяемой за рубежом, так же как и в СССР, является сульфатцеллюлозная бумага, имеющая примерно те же пределы толщины. Передовые бумажные фирмы изготавливают конденсаторную бумагу из облагороженной целлюлозы на полностью обессоленной (деионизированной) воде, что позволяет им получать пониженные значения $\tan \delta$. В Японии используется также бумага повышенной толщины 50—70 $мм$, по типу приближающаяся к кабельной, но лишь для изготовления конденсаторов с очень большой номинальной реактивной мощностью, порядка 500—600 $квар$; значения $E_{раб}$ при использовании такой бумаги приходится снижать в сравнении с обычной бумагой, что вызывает ухудшение удельных характеристик конденсатора и, по-видимому, лишь отчасти компенсируется пониженной стоимостью этой бумаги. В СССР известны случаи применения кабельной бумаги толщиной 120 $мм$ для мелкосерийного изготовления импульсных конденсаторов высокого напряжения (в мастерских при вузах), но в практике заводского производства кабельная бумага, обладающая пониженной электрической прочностью по сравнению с конденсаторной, применяется только как изоляция секций от корпуса.

Новым сортом конденсаторной бумаги является о к с и д н а я б у м а г а, разработанная финляндской фирмой Тервакоски. Оксидная бумага представляет собой обычную тонкую сульфат-

целлюлозную конденсаторную бумагу, в которую добавлено некоторое количество активированной окиси алюминия порядка 2—3% (соответственно бумага имеет увеличенную зольность). Бумага предназначена для изготовления конденсаторов, пропитанных полярными хлорированными массами (которые весьма чувствительны к загрязнениям) и благодаря присутствию в ней такого адсорбента, как Al_2O_3 , способна доочищать хлорированную массу уже после заливки ее в конденсатор. В сухом состоянии угол потерь этой бумаги мало отличается от угла потерь обычной конденсаторной бумаги, но если сравнивать те же образцы бумаги после пропитки хлордифенилом, то можно заметить сниженные значения $\text{tg } \delta$ оксидной бумаги в области повышенных температур, а также при пониженных значениях напряженности поля, когда особенно сильно сказывается наличие загрязнений, которые связываются адсорбентом в оксидной бумаге.

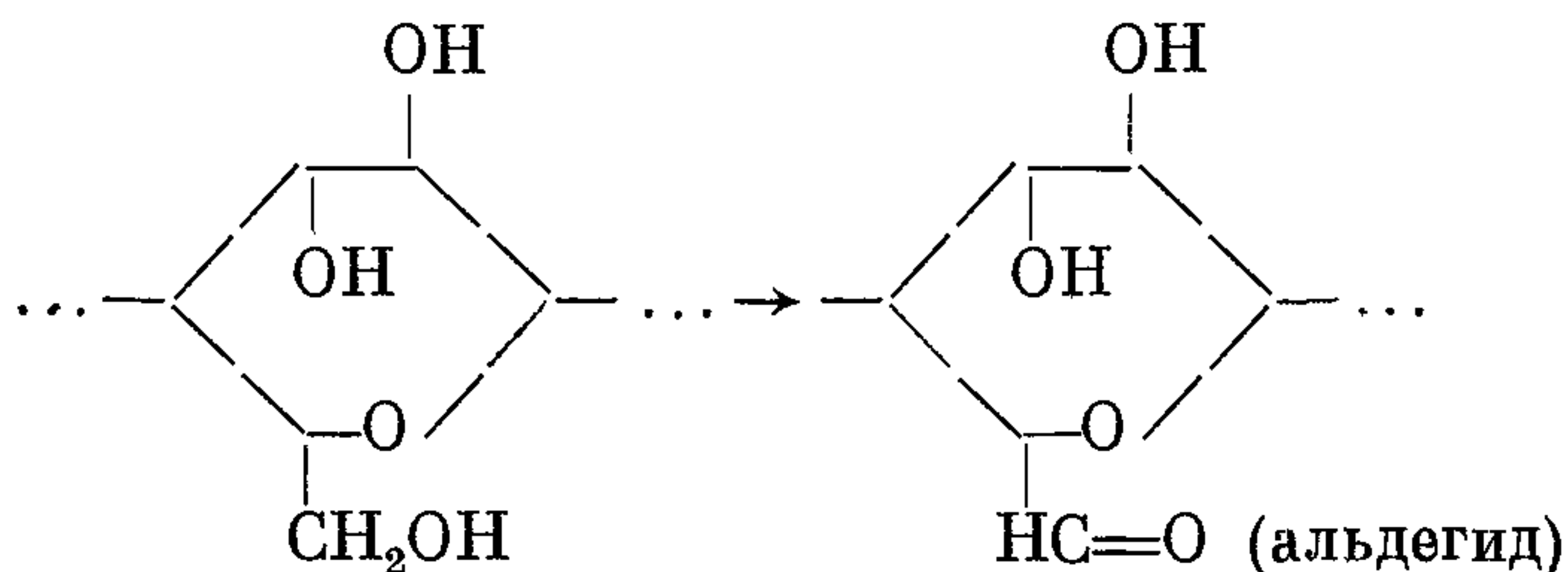
При выборе температуры сушки в производстве бумажных конденсаторов, а также при установлении их предельной рабочей температуры необходимо учитывать **н а г р е в о с т о й к о с т ь** б у м а г и. Основа бумаги — клетчатка — при нормальной температуре является химически устойчивым материалом, но при нагревании в ней начинаются химические процессы, приводящие в конечном счете к ее разрушению. При отсутствии влаги и кислорода можно наблюдать чисто **т е р м и ч е с к у ю д е с т р у к ц и ю** (пиролиз), характеризующуюся разрывом молекулярных цепей клетчатки и снижением степени полимеризации. При высоком вакууме интенсивный распад и разложение клетчатки с образованием углерода и жидких и газообразных продуктов происходят при температурах порядка 250—275° С; при 230° С в высоком вакууме еще не наблюдается полного распада молекул клетчатки, хотя снижение степени полимеризации имеет место. При наличии влаги может идти **п р о ц е с с г и д р о л и з а** клетчатки, характеризующийся разрывом кислородных мостиков (глюкозидных связей) и присоединением гидроксильных групп в местах разрыва:



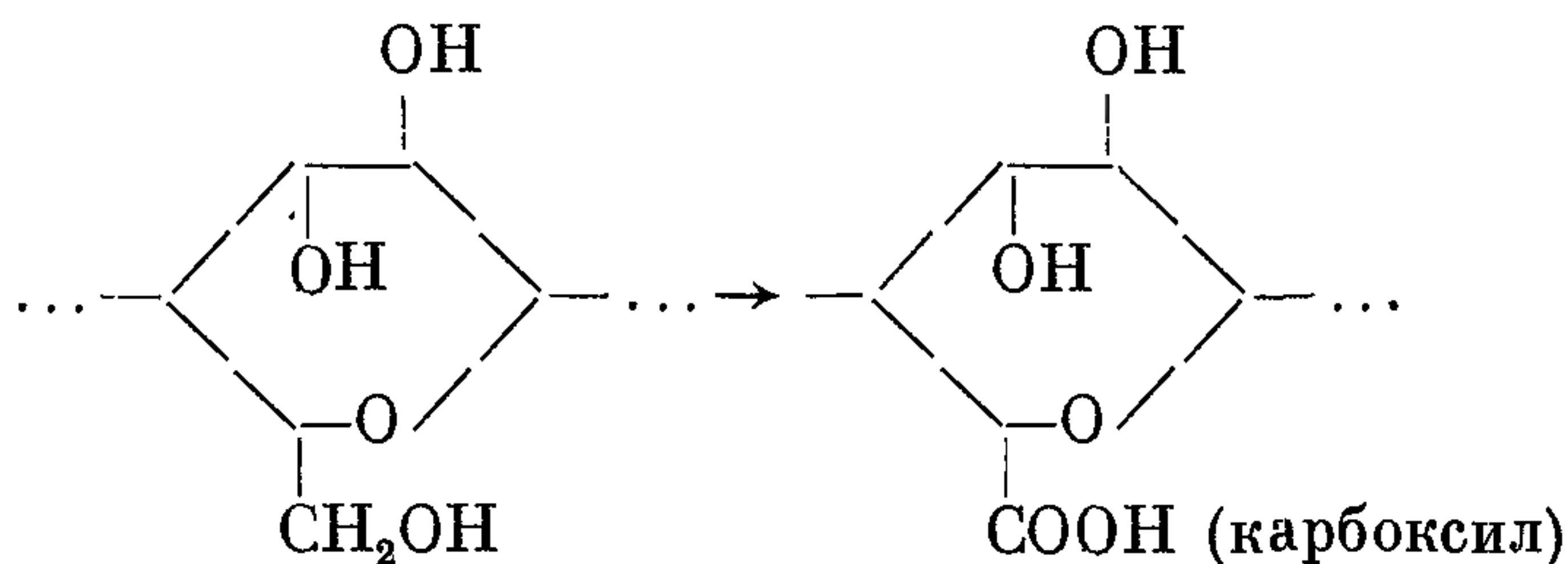
Наличие в бумаге следов минеральных кислот ускоряет процесс гидролитического распада, так как кислоты снижают энергию

активации глюкозидных связей. При наличии гидролиза разрушение бумаги может происходить при более низких температурах, чем чисто термическая деструкция; практически длительная сушка при техническом вакууме (остаточное давление 0,1—1 мм рт. ст.) при температурах порядка 150° С и выше уже может, по-видимому, привести к опасному разрушению бумаги.

При доступе воздуха (кислорода) и повышенной температуре начинается окисление клетчатки. Первая стадия окислительных процессов в отличие от гидролиза может не сопровождаться деструкцией молекул и изменением степени полимеризации. Эта стадия может начинаться при температурах порядка 60—70° С и характеризуется окислением первичных гидроксильных групп до альдегидных и далее до карбоксильных:

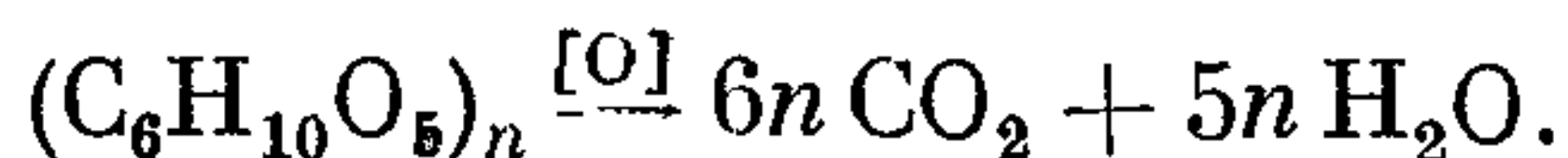


или



Процесс появления альдегидных групп с дальнейшим превращением их в карбоксильные можно заметить, сравнивая инфракрасные спектры конденсаторной бумаги в различных стадиях ее выдержки на воздухе при повышенной температуре (рис. 208).

Дальнейшая стадия окисления связана уже с деструкцией молекул и образованием моно- и дикарбоновых кислот. Последняя стадия окисления завершается полным разложением клетчатки на окись углерода и воду:



Умеренное окисление бумаги, как показали исследования, проведенные в США и СССР, не только не опасно, но даже дает улучшение постоянной времени конденсаторов и повышение их срока службы (при постоянном напряжении). По-видимому, это объясняется тем, что увеличение

числа карбоксильных групп в процессе окисления (до некоторого оптимума) увеличивает способность бумаги к ионнообменным реакциям, в результате чего часть особенно подвижных ионов, присутствующих в бумаге и пропиточной массе, закрепляется на молекулах клетчатки; это дает снижение проводимости, рост постоянной времени и, как следствие, замедление электрохимического старения и увеличение срока службы.

О начинающейся деструкции бумаги при нагревании можно судить по изменению ее механических свойств (например, сопротивления продавливанию) (рис. 209) и по повышению кислотности (снижению рН — водной вытяжки); можно использовать также наблюдение на изменение вязкости медноаммиачного раствора. При нагреве на воздухе можно заметить также и изменения электрических свойств бумажных конденсаторов (например, угла потерь), которое усиливается с повышением температуры при длительном нагреве.

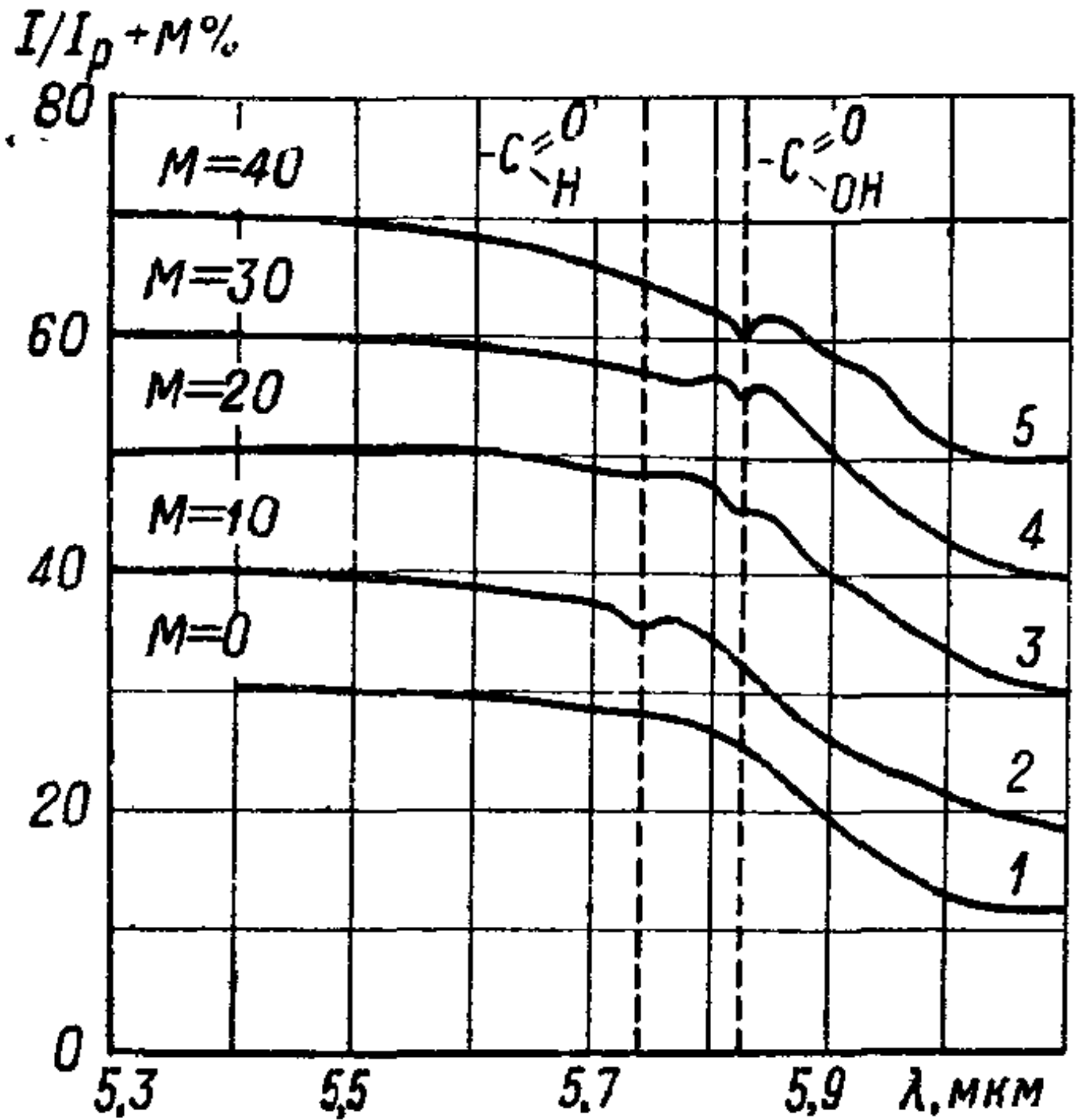


Рис. 208. Влияние времени прогрева конденсаторной бумаги при 120° С на ее спектр пропускания в области 5,3—6,1 мкм.

1 — исходный образец; 2 — после прогрева 9 ч: появился минимум пропускания при 5,75 мкм — альдегиды; 3 — после 26 ч: появился минимум также и при 5,82 мкм — карбоксилы; 4 — после 60 ч: альдегиды уже перешли в карбоксилы; минимум только при 5,82 мкм; 5 — после 87 ч: количество карбоксилов увеличилось.

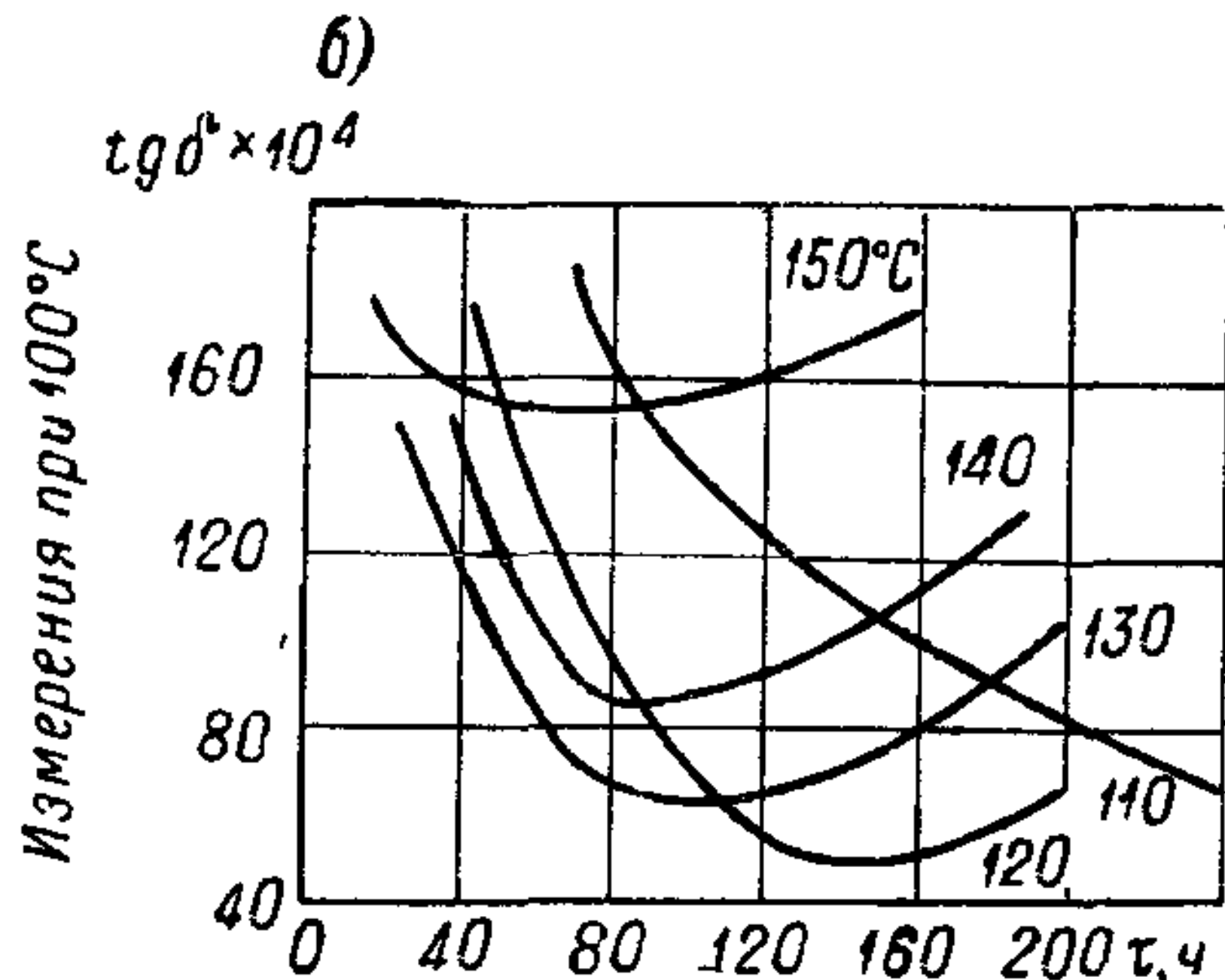
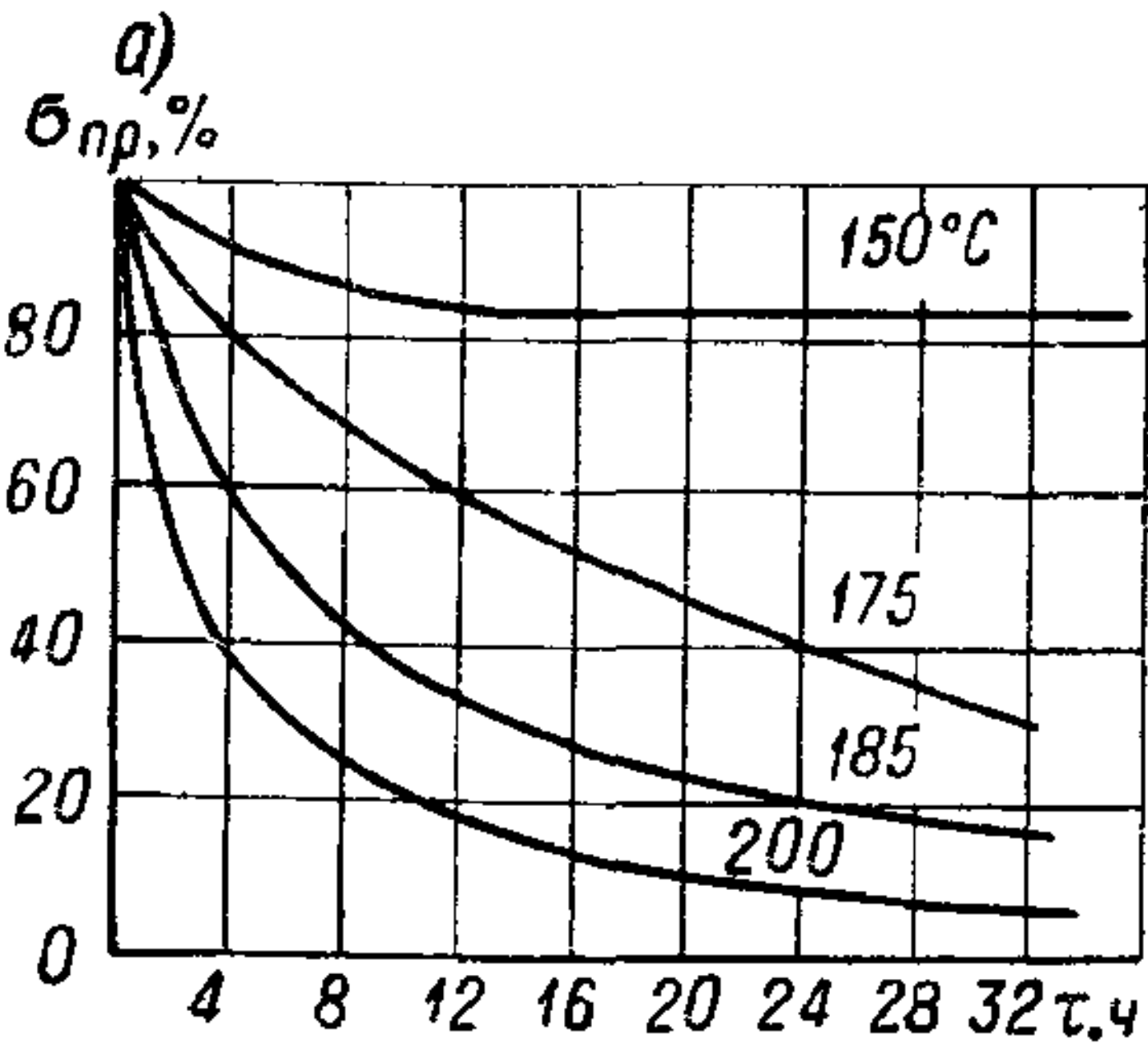


Рис. 209. Изменение свойств бумаги при нагреве без вакуума при различных температурах: а — зависимость сопротивления продавливанию образцов бумаги от времени нагрева; б — зависимость угла потерь бумажных силовых конденсаторов, измеренного при 100° С, от времени нагрева. Цифры у кривых — температура нагрева в °С.

В герметизированных конденсаторах окисление бумаги мало вероятно (оно может идти только за счет остаточного воздуха,

растворенного в пропиточной массе или находящегося в «воздушной подушке»), но возможны гидролитическая и термическая деструкция; имеются основания ожидать, что воздействие сильного постоянного поля может усилить деструктивные процессы, вызванные воздействием высокой температуры. Практически имеется возможность, как уже отмечалось выше, применять бумажные конденсаторы при температурах порядка $100-125^{\circ}\text{C}$ при сниженных значениях напряженности поля. Для обеспечения длительной работы бумажного конденсатора при высокой температуре играет роль не только нагревостойкость бумаги, но и правильный выбор пропиточной массы и даже материала обкладок (см. рис. 34).

§ 77. Пропиточные массы

Современное конденсаторостроение применяет большой ассортимент пропиточных масс; их можно разделить прежде всего на жидкие и твердые.

Основным преимуществом жидких пропиточных масс является полное заполнение всех пор в бумаге, если пропитка

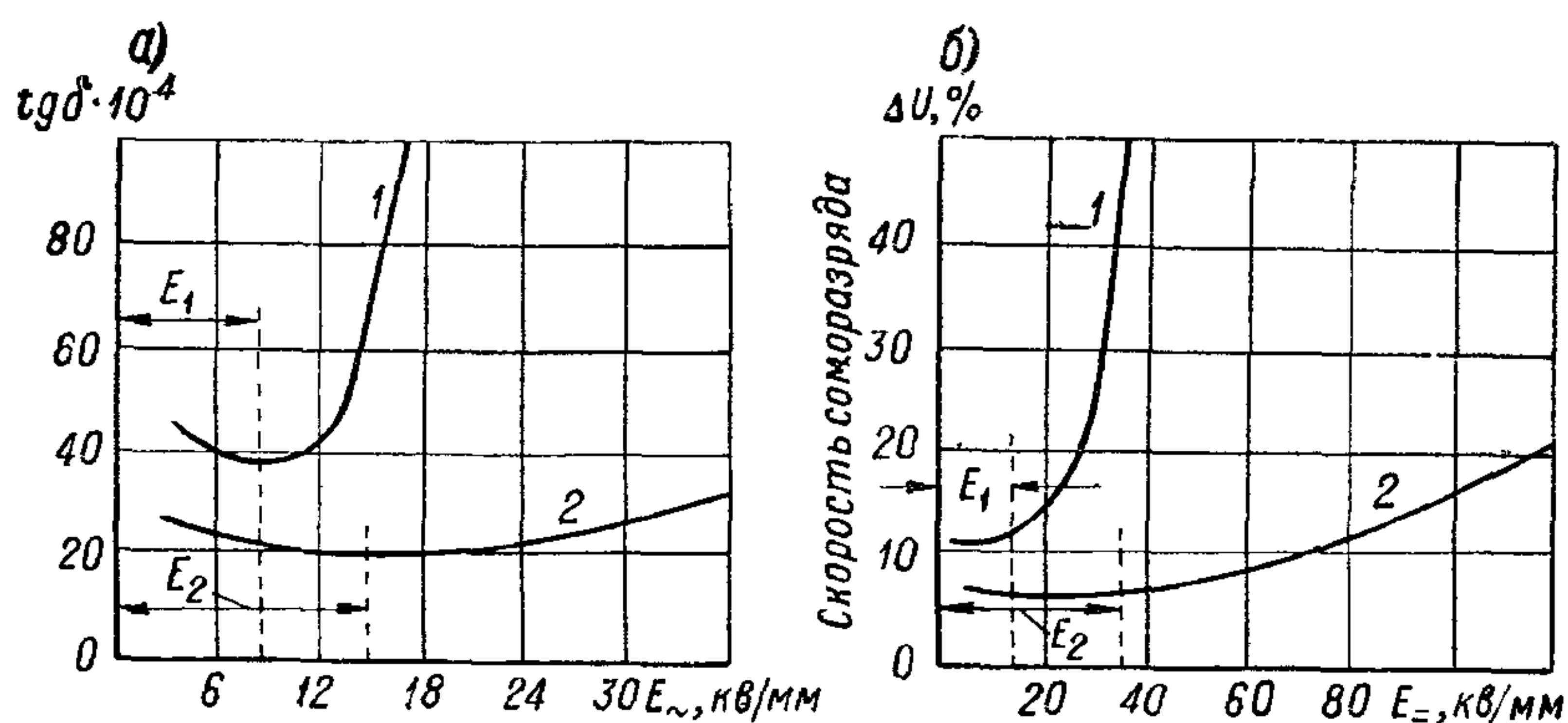


Рис. 210. Влияние напряженности поля на угол потерь бумажных конденсаторов при переменном напряжении (а) и на скорость саморазряда при постоянном (б).

1 — пропитка твердым воскообразным веществом; 2 — пропитка маслом.

проводится при высоком вакууме, в отличие от твердых масс, которые обладают усадкой, вызывающей образование остаточных газовых включений в диэлектрике конденсатора. Поэтому при равных значениях ϵ пропитка жидкой массой дает увеличение емкости по сравнению с твердой массой (рис. 203, а). Наличие остаточных газовых включений при пропитке твердой массой вызывает снижение ионизирующего напряжения и пробивной напряженности бумажного диэлектрика. Резкое улучшение $E_{\text{ион}}$ и возможность соответствующего повышения $E_{\text{раб}}$ (рис. 210) при переходе от твердой пропитки к пропитке жидким диэлектриком обеспечили жидким пропитывающим массам преимущественное применение в произ-

водстве высоковольтных бумажных конденсаторов как при переменном, так и при постоянном напряжении. Твердые пропиточные массы обычно применяются только при изготовлении конденсаторов постоянного напряжения при $U_{\text{ном}}$ не выше 600—1000 в, а при переменном напряжении, когда ионизация еще более опасна, при $U_{\text{ном}}$ не выше 250—300 в.

Основным преимуществом твердых пропиточных масс является возможность упрощения конструкции конденсатора, если от него не требуется работа в условиях высокой влажности. При жидкой пропиточной массе, независимо от климатических условий, в которых будет применяться конденсатор, требуется герметизация конструкции, чтобы устранить возможность выте-

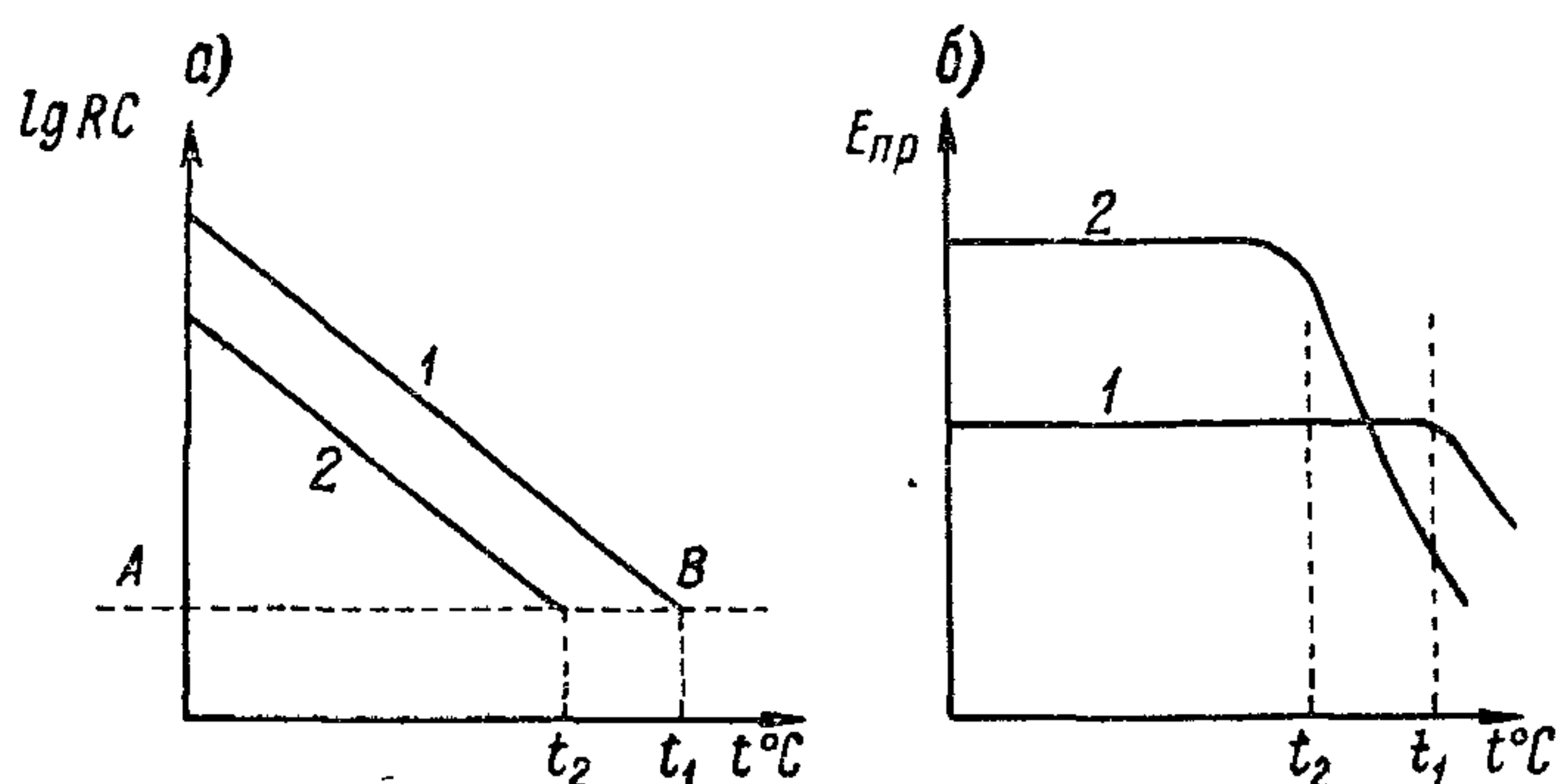


Рис. 211. Зависимость постоянной времени (а) и электрической прочности (б) от температуры для бумажных конденсаторов с жидкой (1) и твердой (2) пропиткой. АВ — граница теплового пробоя; t_1 и t_2 — верхний предел рабочей температуры.

кания жидкой массы из конденсатора. Твердая пропиточная масса не вытекает, если температура не превосходит точку ее плавления; поэтому, если конденсатор рассчитан на легкие условия работы (например, в гражданской радиоэлектронной аппаратуре), то его можно не герметизировать и применить более дешевую и простую уплотненную конструкцию (§ 42, А). Кроме того, используя твердую пропиточную массу, в принципе легче получить более высокую постоянную времени бумажного конденсатора, чем при пропитке жидкой массой. Это объясняется тем, что диссоциация загрязнений с образованием свободных ионов легче происходит в жидкости, чем в твердом теле. Поскольку граница развития теплового пробоя (§ 34) при постоянном напряжении определяется некоторым минимальным значением постоянной времени, улучшение этой характеристики сдвигает в сторону повышенных значений максимальную рабочую температуру, выше которой возникает опасность теплового пробоя (рис. 211, а); поэтому можно себе представить такие условия, когда в области низких температур жидкая пропитка дает высокие значения $E_{\text{пр}}$, но при высоких температурах снижает

$E_{пр}$ так, что конденсатор, пропитанный твердой массой, оказывается уже электрически более прочным (рис. 211, б). В связи с этим в ряде случаев проблему повышения рабочей температуры бумажного конденсатора с небольшим номинальным напряжением постоянного тока оказывается легче решить с применением пропитки твердой массой с высоким удельным сопротивлением.

Кроме твердых и жидких масс, находят себе применение также полужидкие массы с консистенцией мазей, которые ожижаются при рабочей температуре конденсатора, поэтому их можно относить к жидким массам. Некоторые характеристики пропиточных масс различных типов, применяемых современным конденсаторостроением, приведены в табл. 20.

Как твердые, так и жидкие массы могут быть неполярными или полярными, что заметно отражается на их электрических свойствах.

Неполярные массы, представляющие собой преимущественно смеси углеводородов того или иного типа (при хорошей очистке от загрязнений), отличаются малым $\operatorname{tg} \delta$ и повышенным удельным сопротивлением как для твердых, так и для жидких масс. В связи с этим применение подобных масс для пропитки бумажных конденсаторов позволяет получать конденсаторы с относительно малыми потерями даже при повышенных температурах и с высокой постоянной времени, до 10 000—20 000 ом·ф при 20° С.

Недостатком этих масс является небольшая диэлектрическая проницаемость $\epsilon_n = 2 \div 2,5$, что снижает удельную емкость конденсатора. Для бумаги, пропитанной такими массами, $\epsilon \approx 3,5 \div 4$. Неполярные массы снижают ϵ_n при повышении температуры; для твердых неполярных масс переход через $t_{пл}$ дает скачок ϵ_n (см. рис. 7, б). Сухая бумага дает увеличение ϵ при нагревании (рис. 201); при пропитке неполярной массой бумаги повышенной плотности, когда количество впитанной массы невелико, сохраняется положительный знак ТКЕ при температурах выше нуля, при бумаге пониженной плотности, когда количество впитанной массы увеличено, ТКЕ делается отрицательным. В области температур ниже нуля при охлаждении бумажного конденсатора с неполярной пропиткой его емкость снижается в соответствии с уменьшением ϵ_k клетчатки. При частоте 50 гц охлаждение до —60° С дает в этом случае снижение емкости не более 5—10%. В общем, при неполярной пропитке емкость бумажного конденсатора относительно мало меняется с температурой.

Основным типом неполярной пропитывающей жидкости является нефтяное масло, применяемое у нас как для пропитки высоковольтных конденсаторов постоянного и импульсного напряжения, так и для пропитки силовых конденсаторов переменного напряжения. Термин «нефтяное масло» представляет собой широкое понятие, охватывающее ряд сортов масел, получаемых при перегонке нефти. После отгонки из нефти легколетучих фрак-

Некоторые характеристики основных типов пропиточных масс для конденсаторостроения

Таблица 20

Название массы	Плотность, $\Gamma/\text{см}^3$	Температура плавления или застывания, °C	ϵ $t = 20^\circ \text{C}, f = 1 \text{ кгц}$		ρ , ом · см при $t = 10^\circ \text{C}$
			$\text{tg } \delta \times 10^4$		
Жидкие непоярные					
Конденсаторное масло	0,86—0,89	— (40 ÷ 45)	2,1—2,2	1—2	10^{13} — $3 \cdot 10^{13}$
Вязкое нефтяное масло	0,90—0,91	— (5 ÷ 10)	2,1—2,2	1—2	10^{13} — $3 \cdot 10^{13}$
Полиизобутилен	1,00—1,01	Ниже —60	2,2—2,3	0,5—1	$3 \cdot 10^{14}$ — $6 \cdot 10^{14}$
Вазелин	0,83—0,88	+ (30 ÷ 40)	2,1—2,2	2—3	$5 \cdot 10^{12}$
Жидкий полисилоксан	0,92—0,95	Ниже —60	2,3—2,7	2—5	$3 \cdot 10^{13}$
Твердые неполярные					
Парафин	0,85—0,92	+ (50 ÷ 55)	2,1—2,2	3—7	$3 \cdot 10^{12}$
Церезин	0,88—0,95	+ (65 ÷ 80)	2,2—2,5	3—5	$5 \cdot 10^{12}$
Синтетический церезин	0,91—0,96	+ (100 ÷ 105)	2,4—2,6	3—5	10^{12} — 40^{13}
Жидкие полярные					
Касторовое масло	0,95—0,97	— (15 ÷ 17)	4,2—4,7	10—15	$2 \cdot 10^{10}$
Трихлордифенил (МГ-35)	1,38	—18	5,9	5—10	10^{11} — 10^{12}
Пентахлордифенил-солол (МГ-50)	1,55	+ (5 ÷ 10)	5,1	5—10	$3 \cdot 10^{11}$ — $3 \cdot 10^{12}$
Нитросолол	1,50	—12	8—8,3	25—50	10^9 — 10^{10}
Пирален 1500	1,35	—24	6,3	5—10	10^{11} — 10^{12}
» 1460	1,43	—50	5,9	5—10	10^{11} — 10^{12}
64% пентахлордифенила + 36% трихлорбензола	1,51	—35	4,3	5—10	10^{11} — 10^{12}
Дихлортриметилфенилидан (МГ-15) — IN420	1,14	+ (8 ÷ 10)	5,8	5	$3 \cdot 10^{11}$ — $3 \cdot 10^{12}$
Тетрахлорэтилбензол (МГ-45)	1,48	—45	4,2	5—10	10^{11} — 10^{12}
60% тетрахлорэтилбензола + 40% трихлорбензола (МГ-45)	—	—60	4,3	5—10	10^{11} — 10^{12}
Фторированный эфир (PFE774)	1,65	—35	6,1	2—5	$5 \cdot 10^{11}$ — 10^{12}
Цианоэтилсахароза	1,2	—30	35	100—1000	10^9 — 10^{10}
Твердые полярные					
Полихлорнафталин	1,5—1,6	+ (90 ÷ 130)	4,5—5	5—20	10^{10} — $5 \cdot 10^{11}$
Ланостерол	—	+100	10—12	—	—
Олеовакс	0,97—0,99	+ (75 ÷ 80)	10—20	700—1500	10^{12}
Поливинилкарбазол	1,2	+150*	3	7—10	10^{14}
Эпоксидная смола	1,1—1,2	+ (100 ÷ 125)*	3,7—4	50—80	10^{13}
Компаунд МБК	1,06	+ (125 ÷ 140)*	3,5	30—50	10^{13}

* Температура размягчения.

ций, применяемых в качестве растворителей и топлива (бензины, керосин), получают легкие масла малой вязкости, используемые для целей смазки и в качестве жидких диэлектриков (конденсаторное, трансформаторное, легкое кабельное). После отгонки этих масел остается густая масса (мазут), из которой можно еще отогнать остаточные масла с повышенной вязкостью. Они также могут использоваться как для смазки, так и для изоляции (например, брайтсток, относящийся к этому типу масел, применяется для пропитки некоторых типов кабелей, а, иногда, и для конденсаторов).

По своему составу очищенные нефтяные масла представляют собой смесь жидких углеводородов трех основных типов: метановых (парафиновых) C_nH_{2n+2} , образующих открытые цепи насыщенных углеродных атомов, нафтеновых C_nH_{2n} , также насыщенных (предельных), но образующих кольца, и ароматических C_nH_{2n-m} — ненасыщенных соединений, составленных из бензольных колец C_6H_6 в различных сочетаниях. Основные типы углеводородов, входящих в состав масла, могут образовывать общие молекулы: могут быть соединения, содержащие как нафтеновые, так и ароматические кольца: к ароматическому или нафтеновому кольцу может быть присоединен «хвост» в виде метановой цепочки. Это весьма осложняет анализ масла. Обычно ограничиваются указанием содержания в масле метано-нафтеновой фракции и процента ароматических колец. Новым методом, позволяющим быстро установить содержание ароматики в масле, является метод исследования инфракрасного спектра изучаемого масла. Ароматика дает поглощение при длине волны 6,25 μm и, имея образцы, для которых инфракрасные спектрограммы сопоставлены с результатами химического анализа, можно оценить содержание ароматики в испытуемом масле по глубине минимума пропускания на спектрограмме при указанной длине волны (рис. 212). Некоторое представление о составе масла могут дать такие его физические константы, как плотность γ и коэффициент преломления n_D^{20} , которые заметно увеличены у масел с высоким содержанием ароматической фракции.

Электрические свойства нефтяных масел различного состава при достаточно хорошей сушке и очистке имеют близкий уровень, если не считать небольшого увеличения ϵ и несколько ухудшенного $\tan \delta$ при высоком содержании ароматики. Наличие значительного содержания метановых углеводородов отражается на повышении температуры застывания масла. Однако особенно сильно сказывается различие в составе нефтяных масел в процессе их старения при воздействии температуры и электрического поля.

Воздействие повышенной температуры вызывает в масле окислительные процессы, которые приводят к образованию органических кислот, способных к диссоциации и, следовательно, увеличивающих проводимость масла и ухудша-

ющих его угол потерь. При этом ароматическая фракция масла дает более интенсивное возрастание $\operatorname{tg} \delta$, чем метаноэфтеновая (рис. 213). Повышенной устойчивостью к окислению обладают высокоочищенные вязкие масла с малым содержанием ароматики, но их высокая температура застывания ($-5 \div -10^\circ \text{C}$) делает их неудобными для применения в трансформаторах и конденсаторах. Для заливки трансформаторов нашло применение маловязкое масло, получаемое из нефти нефтенового основания с малым содержанием ароматики и температурой застывания ниже -40°C . Ана-

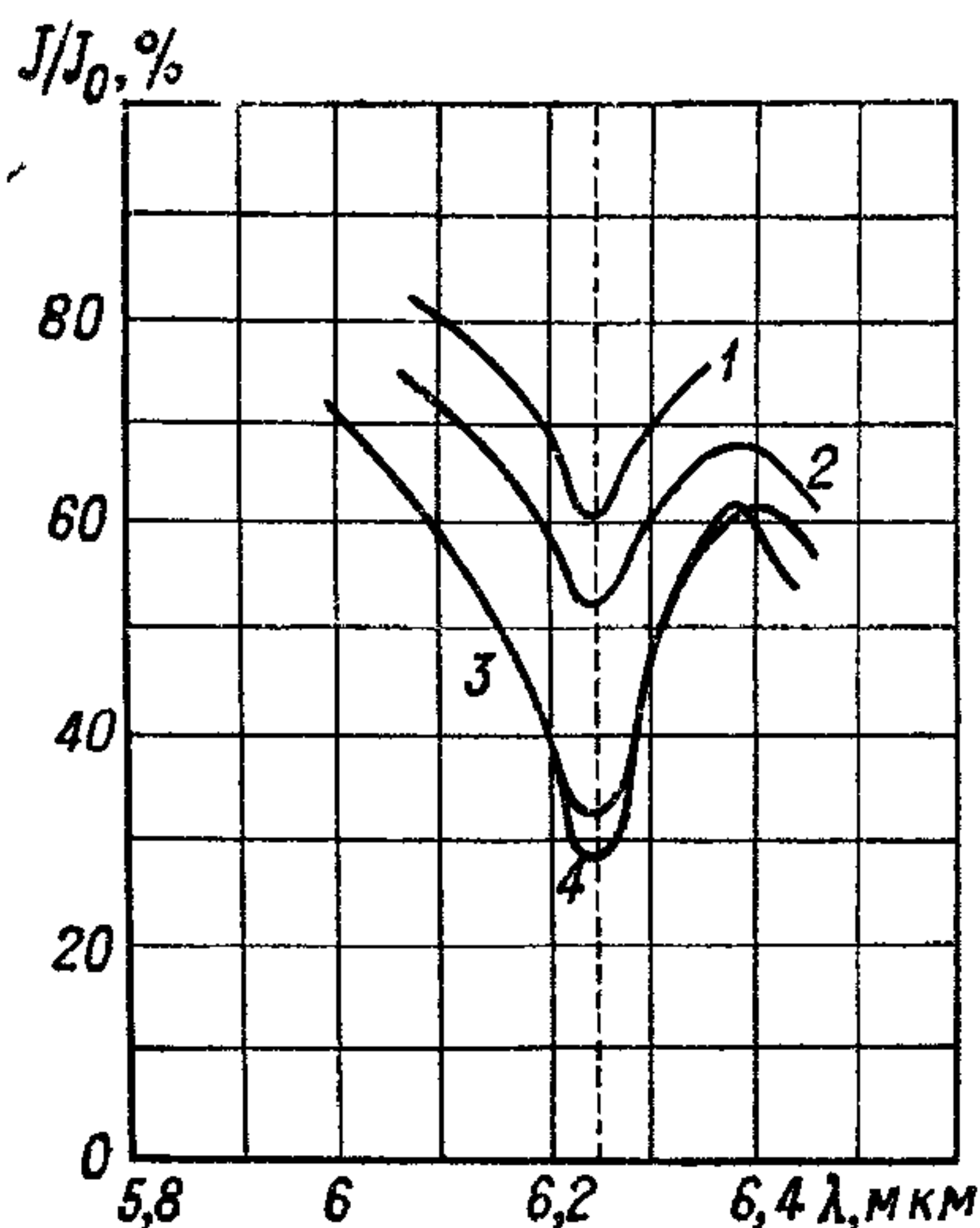


Рис. 212. Спектры поглощения в инфракрасной области для четырех сортов нефтяного масла.

1 — конденсаторное масло; 2, 3, 4 — трансформаторное масло (2 — 3% ароматики, 3 — 13,8% ароматики; 4 — 17,4% ароматики).

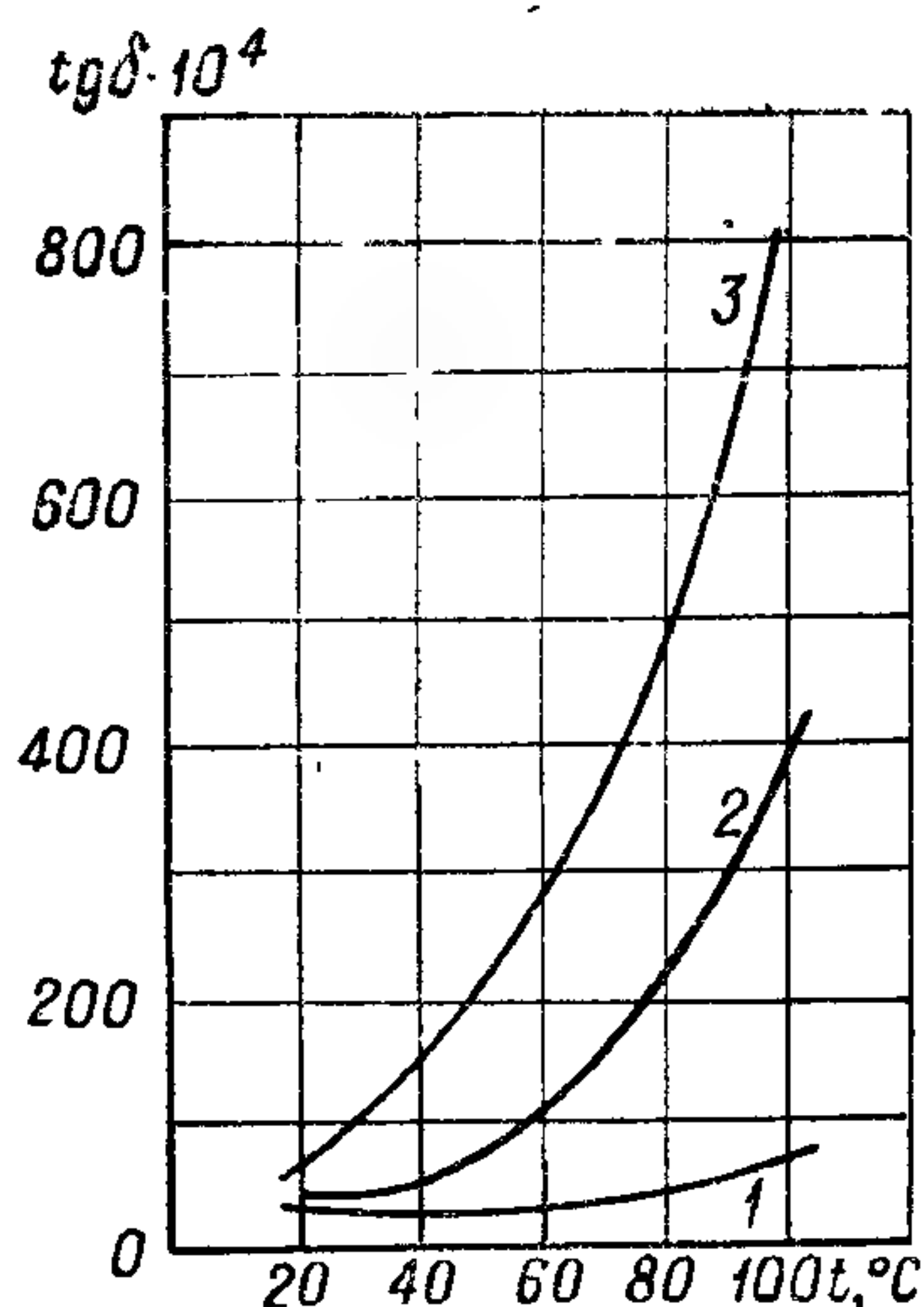
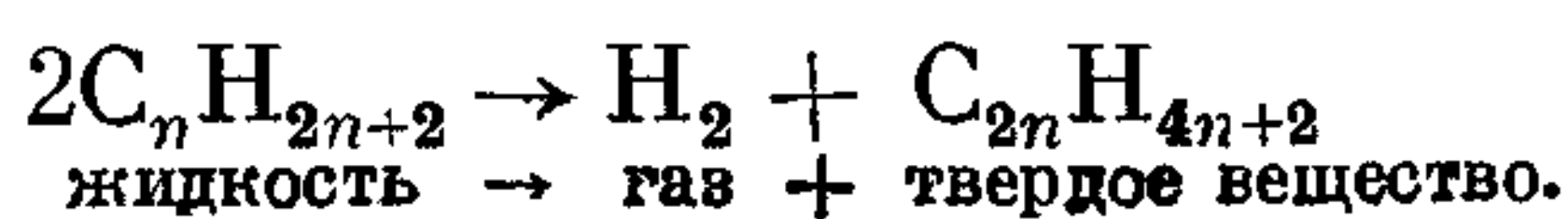


Рис. 213. Зависимость угла потерь от температуры для образца нефтяного масла (1) и для его фракций: метаноэфтеновой (2) и ароматической (3).

логичное масло, но с более глубокой очисткой серной кислотой и адсорбентами, т. е. с еще меньшим содержанием ароматики (рис. 212), под названием «конденсаторное масло» нашло основное применение в конденсаторостроении как обладающее повышенной устойчивостью электрических свойств при длительном нагреве.

В о з д е й с т в и е э л е к т р и ч е с к о г о п о л я, особенно переменного, приводит к разложению масла под воздействием ионной бомбардировки, вызванной возникновением ионизации в пузырьках остаточного воздуха или непосредственно в масляных прослойках. При этом образуются газы, прежде всего — водород и твердые нерастворимые продукты, называемые обычно «Х-воск». Для случая метанового углеводорода можно написать:



Выделение газа способствует образованию газовых включений в диэлектрике, поддерживающих и усиливающих ионизацию; образование «Х-воска» связано с уплотнением молекул масла и образованием пустот в порах бумаги, заполняющихся газом. Поэтому при длительном развитии ионизации ионизирующее напряжение бумажномасляного диэлектрика снижается до тех же значений, которые получаются при пропитке бумаги твердым веществом; при этом $E_{\text{раб}}$ оказывается выше сниженного значения $E_{\text{ион}}$, дальнейшее развитие ионизации идет очень интенсивно и конденсатор

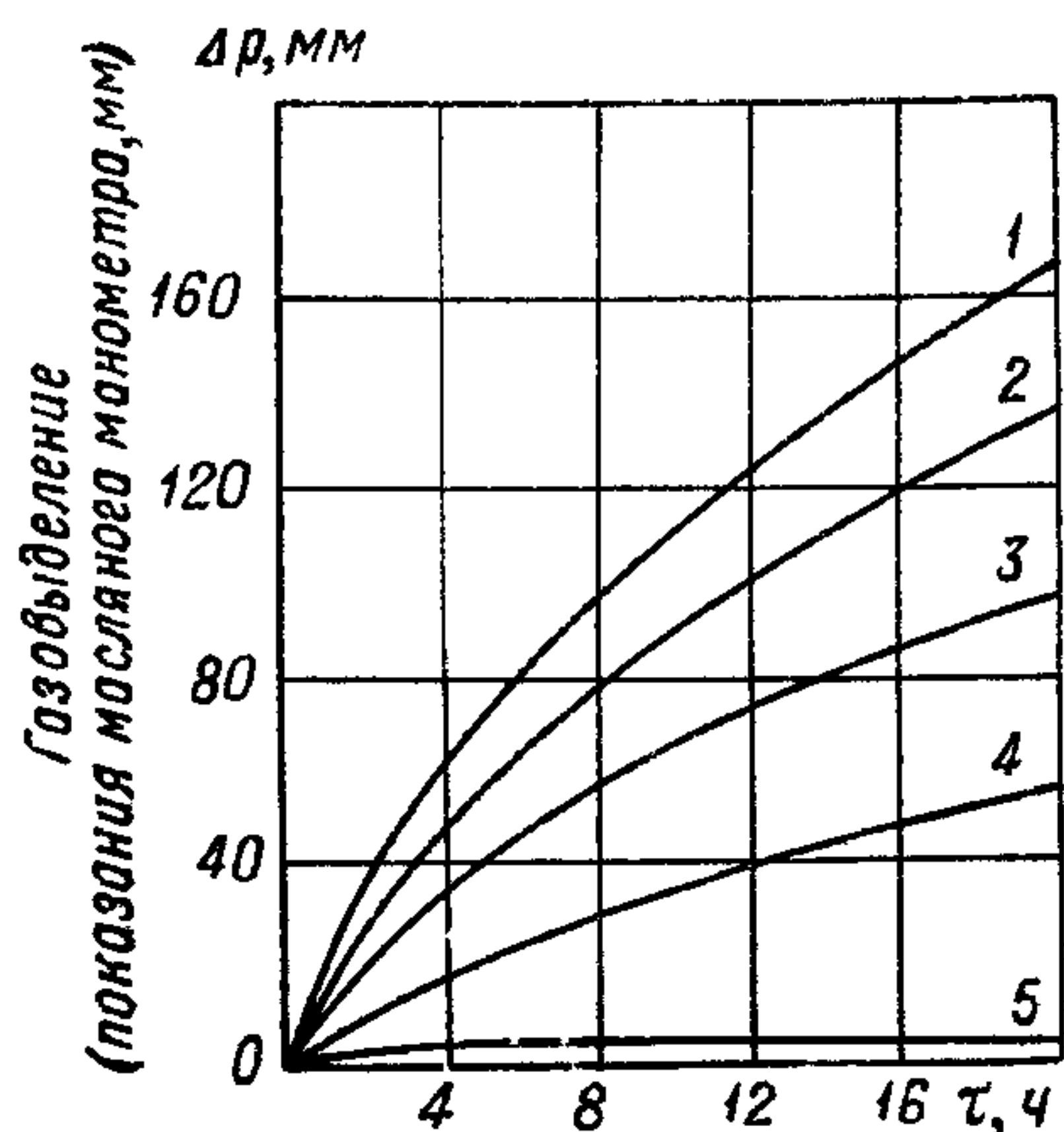


Рис. 214. Влияние содержания ароматики в масле на интенсивность газовой выделенности в переменном электрическом поле (макет конденсаторной секции в испытуемом масле, на воздухе; 25 кв/мм, 50 гц).

1 — конденсаторное масло (менее 3% ароматики); 2 — 3% ароматики; 3 — 13,8% ароматики; 4 — 17,4% ароматики; 5 — конденсаторное масло с добавкой 15% бензола.

погибает (§ 35). Выделение водорода под действием ионной бомбардировки должно быть тем интенсивнее, чем больше его содержание в молекулах масла. Поэтому при старении под действием поля, в отличие от старения под действием нагрева, повышенное содержание ароматики сказывается положительно, снижая газовыделение (рис. 214). Поскольку ароматические углеводороды являются ненасыщенными, т. е. содержат двойные связи, можно ожидать, что ароматика способна присоединять к себе водород под действием поля, т. е. давать не газовыделение, а газопоглощение; это действительно наблюдается, если подвергать действию поля ароматическую фракцию масла в среде водорода. Добавка простейшего ароматического углеводорода — бензола — в конденсаторное масло резко снижает газовыделение. Те масла,

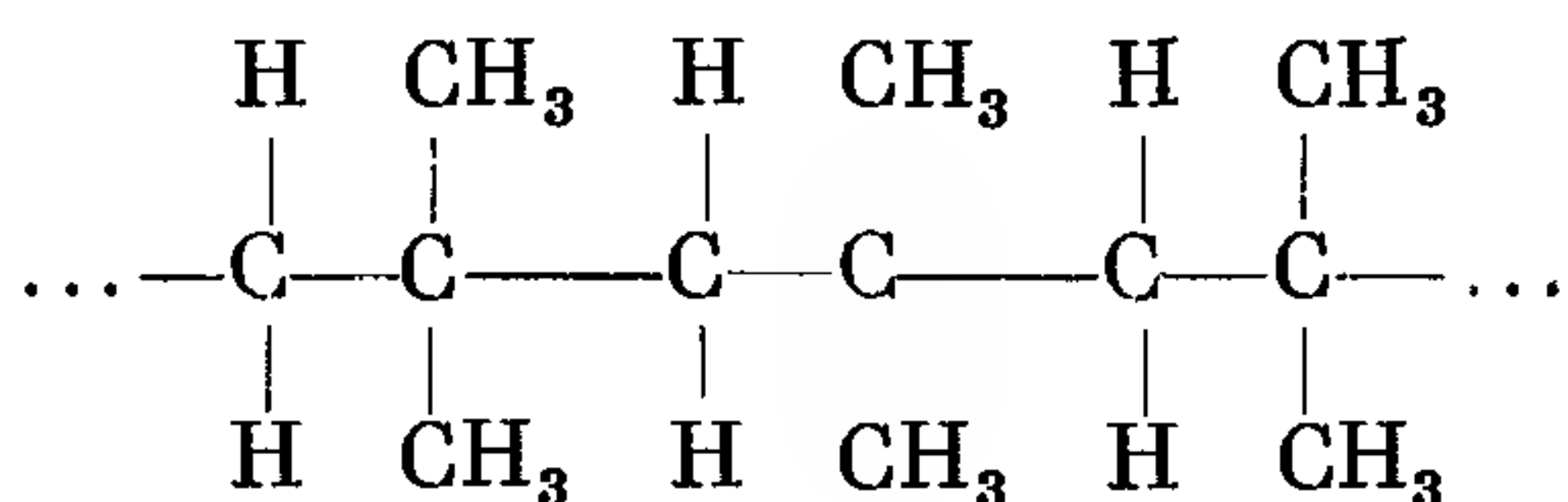
которые при испытании на действие поля в специальном приборе в течение длительного времени не дают газовой выделенности, носят название «газостойких масел».

Таким образом, для получения масла, устойчивого как при нагревании, так и при воздействии переменного электрического поля, надо идти на компромисс, подбирая такое содержание ароматики, которое обеспечивает достаточную газостойкость, но еще не дает недопустимо высокого возрастания $\text{tg } \delta$ при нагревании. Верхним пределом температуры работы масла в силовых конденсаторах переменного напряжения является $+60 \div 70^\circ \text{C}$. При постоянном напряжении, когда ионизационные явления менее опасны и можно применять высокоочищенные масла (например, вазелиновое), более устойчивые к окислению, этот предел повышается до $+100 \div 125^\circ \text{C}$ при условии надежной герметизации.

Недостаточная устойчивость нефтяного масла при переменном поле, о которой мы уже упоминали ранее (§ 35), приводит к замене его в производстве силовых конденсаторов переменного напряжения полярными хлорированными жидкостями. В конденсаторах на повышенные рабочие температуры при постоянном напряжении масло заменяется более нагревостойкой пропитывающей жидкостью — октолом.

В производстве бумажных радиоконденсаторов с рабочим напряжением до 1500 в постоянного тока вместо масла обычно применяется в а з е л и н. Он представляет собой мазеподобную смесь жидких и твердых углеводородов, которую получают, смешивая машинное масло средней вязкости с петролатумом. По электрической прочности бумажновазелиновые конденсаторы несколько уступают бумажномасляным, особенно при температурах ниже нуля, но для них легче получить более высокую постоянную времени и более высокую стабильность емкости при изменениях температуры.

Как масло, так и вазелин имеют недостаточно высокое ρ , чтобы обеспечивать достаточную устойчивость бумажных конденсаторов большого размера против теплового пробоя при 100—125° С, что заставляет в этих условиях резко снижать $E_{\text{раб}}$. Заметное повышение постоянной времени таких конденсаторов, позволяющее отдалить опасность теплового пробоя и повысить рабочую напряженность поля, дает применение для пропитки н и з к о м о л е к у л я р н о г о п о л и и з о б у т и л е н а. В США эта пропиточная масса известна под названием витамин Q. Изобутилен — это углеводород состава: $(\text{CH}_3)_2\text{C}=\text{CH}_2$; полиизобутилен образует длинные молекулы — цепочки:



Высокомолекулярный полиизобутилен, представляющий собой каучукоподобное вещество и имеющий степень полимеризации порядка десятков тысяч, нашел применение в кабельной технике в качестве добавки к полиэтилену. Низкомолекулярный полиизобутилен со степенью полимеризации 800—1200 применяется для пропитки конденсаторов. Это сильно вязкая бесцветная жидкость, которая при тщательной очистке может обеспечить при 100° С величину $\rho \approx 3-6 \cdot 10^{14}$ ом·см и примерно в 10 раз повысить постоянную времени бумажного конденсатора при 100—125° С по сравнению с пропиткой маслом или вазелином. Наряду с полиизобутиленом предложено использование более дешевого продукта: смеси полимеров изобутилена и нормального бутилена: $\text{C}_2\text{H}_5 \cdot \text{CH}=\text{CH}_2$. Эта пропиточная масса, близкая по свойствам к полиизобутилену, получила название о к т о л.

К числу неполярных пропитывающих жидкостей с повышенной нагревостойкостью можно отнести кремнийорганические жидкости (жидкие полисилоксаны), первым представителем которых явилась у нас жидкость «Калория-2». Аналогичный продукт применяется и в США под названием «жидкий силикон». В частности, в американском конденсаторостроении нашел применение продукт этого типа — диметилсилоксан, состав которого может быть выражен формулой



Находят себе применение также полиметил- и полиэтилсилоксаны, обладающие близкими электрическими свойствами, но различающиеся по физическим свойствам, прежде всего по вязкости. Кроме того, они различаются по величине $\text{TK}\epsilon$, который для полиметилсилоксанов равен $-(1100 \div 1300) \cdot 10^{-6}$, а для полиэтилсилоксанов $-(700 \div 800) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; для сравнения укажем, что для конденсаторного масла $\text{TK}\epsilon \approx -450 \cdot 10^{-6}$, а для октола $-1580 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Максимальная температура для полисилоксановых жидкостей составляет $150\text{—}180^\circ \text{C}$, но многие из них при этих температурах дают значительные потери на испарение за счет улетучивания легких фракций. Преимуществом этих жидкостей является низкая температура застывания и меньшая зависимость вязкости от температуры, чем для обычных углеводородных жидких диэлектриков. Недостатками их являются: высокая цена, более легкая загрязняемость, выделение SiO_2 при высоких температурах, затрудняющее заварку крышек конденсаторов, пропитанных полисилоксаном. Можно полагать, что в бумажном конденсаторе низкая нагревостойкость бумаги не позволит использовать высокую нагревостойкость полисилоксановой жидкости; поэтому этот вид пропиточной жидкости более целесообразно использовать для пропитки конденсаторов с диэлектриком из нагревостойких синтетических пленок.

Твердые неполярные массы — воскообразные вещества, представляющие собой смеси предельных твердых углеводородов типа $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$, где n — порядка 20 или выше, теперь находят лишь ограниченное применение в конденсаторостроении. Наиболее дешевый материал этого типа — парафин, получаемый как продукт переработки «парафинистых» сортов нефти (с повышенным содержанием твердых углеводородов), мало пригоден из-за своей низкой температуры плавления и используется лишь для пропитки телефонных конденсаторов с рабочей температурой $+45^\circ \text{C}$.

Церезин — продукт очистки ископаемого воскообразного вещества — озокерита (образующегося при естественном перерождении нефти) имеет более высокую температуру плавления, чем парафин, и отличается от него повышенной устойчивостью к окислению. Он находит себе преимущественное применение в производстве ряда типов металобумажных конденсаторов. Синте-

тический церезин представляет собой один из побочных продуктов, получаемых в процессе выработки жидкого топлива из каменного угля. В 30-е годы в Германии он находил себе применение под названием «Воск Z». В СССР также организовано производство этой пропиточной массы, преимуществом которой перед обычным церезином является более высокая $t_{пл}$. Недостатком всех этих воскообразных продуктов является большая усадка при застывании, достигающая 10—15%.

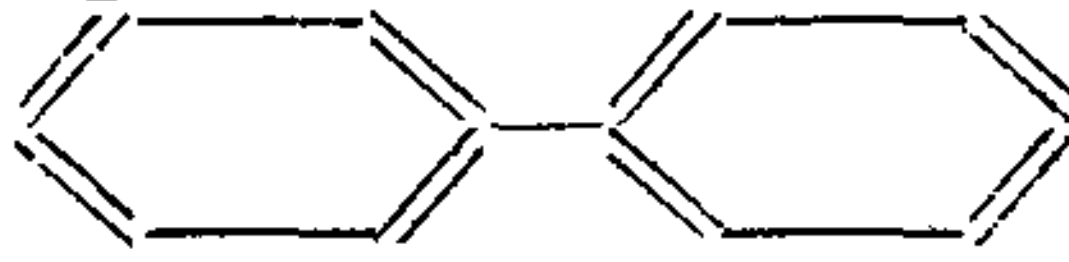
Полярные пропитывающие массы представляют интерес для конденсаторостроения благодаря их повышенной ϵ_n , позволяющей повысить удельную емкость бумажного конденсатора по сравнению с пропиткой его неполярными массами. При значениях $\epsilon_n \approx 5 \div 6$ можно получить выигрыш в емкости порядка 50%, а при $\epsilon_n \approx 10 \div 15$ — до 100%. Дальнейшее повышение ϵ_n , как показывает формула (266), уже не дает существенного дополнительного выигрыша в емкости, но сопровождается заметным ухудшением $\tan \delta$ и ρ , так как увеличение ϵ_n облегчает диссоциацию загрязнений, присутствующих в конденсаторе, и увеличивает проводимость диэлектрика.

Недостатком полярных масс является более резкая зависимость ϵ_n от температуры, особенно в области низких температур (см. рис. 7, ж). В ряде случаев на морозе можно наблюдать снижение емкости бумажных конденсаторов с полярной пропиткой, достигающее до 20—30%. Это накладывает известное ограничение на нижний предел допускаемого интервала температур бумажного конденсатора, пропитанного полярной массой, что обычно не имеет места при пропитке неполярными массами. Частотная зависимость емкости и угла потерь конденсатора при полярной пропитке также может быть заметно ухудшена. Вместе с тем могут быть случаи, когда полярная масса имеет те или иные специфические преимущества по сравнению с неполярной массой, которую она заменяет: повышенную нагревостойкость, большую устойчивость к старению и т. д. Это облегчает внедрение полярных масс даже при их повышенной стоимости, тем более, что благодаря выигрышу в величине ϵ_n получается заметная экономия в бумаге и фольге.

Основным типом жидких полярных пропитывающих масс являются хлорированные дифенилы (пиранол, инертин, аскарель — США, Англия; клофены — ФРГ; пиралены — Франция). Преимуществами их по сравнению с нефтяным маслом, кроме повышенной ϵ_n , являются также негорючесть, повышенная устойчивость к окислению при нагреве и устойчивость к воздействию ионизации при переменном поле¹ (см. рис. 90). При постоянном поле они склонны к разложению (см. рис. 95), но этот

¹ Хлорированные массы на основе этилбензола (МГ-45, МГТ-45; табл. 20) имеют несколько сниженную стойкость к ионизации в сравнении с хлорфенилами.

недостаток можно, в известной степени, устранить, применяя добавку стабилизаторов. В связи с этим за рубежом хлорированные массы получили весьма большое распространение, особенно в производстве силовых конденсаторов, причем ассортимент хлорпроизводных дифенила все время растет. У нас вопросу внедрения подобных продуктов в конденсаторостроение также уделяется внимание.

Основой при изготовлении пропиточных масс этого типа является д и ф е н и л: $C_{12}H_{10}$ или . Расплавляя

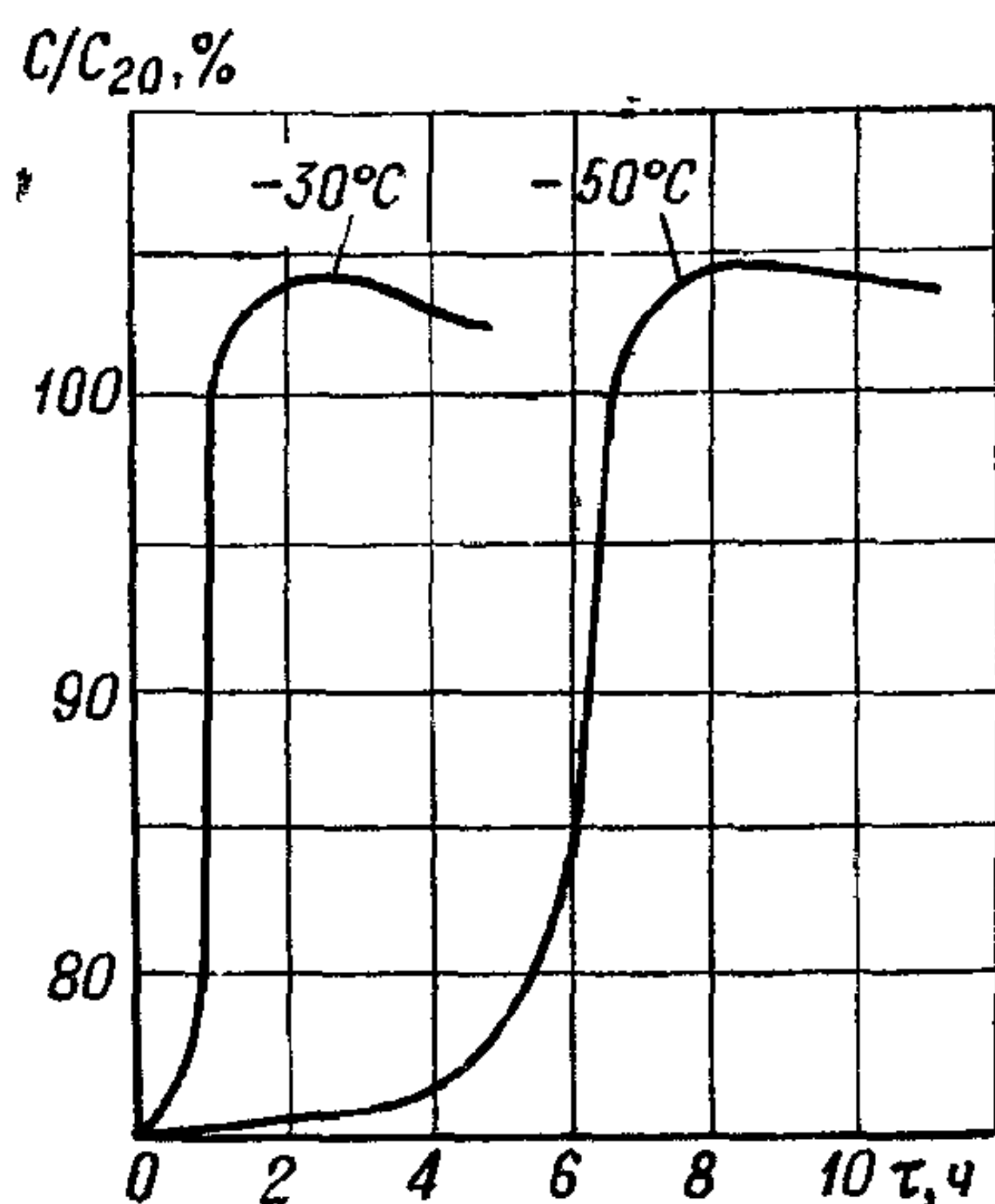


Рис. 215. Восстановление емкости замороженных бумажных конденсаторов, пропитанных пентахлордифенилом, после их включения под переменное напряжение при двух значениях температуры окружающей среды.

это вещество и пропуская через него газообразный хлор в присутствии катализатора, можно получать продукты различной степени хлорирования. Следует отметить, что при одном и том же числе атомов хлора, присоединенных к дифенилу, можно иметь значительное количество изомеров, смесь которых и представляет собой технический продукт. Первым из продуктов данного типа, который нашел себе применение в конденсаторостроении США еще в 30-х годах, явился п е н т а х л о р д и ф е н и л: $C_{12}H_5Cl_5$ (у нас он известен под названием совол). Недостатком этого материала является высокая температура застывания, в связи с чем на морозе заметно падает емкость конденсаторов. После включения замороженного конденсатора он постепенно разогревается за счет диэлектрических потерь и емкость его

восстанавливается (рис. 215); поэтому снижение емкости неопасно, если конденсатор рассчитан на переменное напряжение, способное вызывать саморазогрев. Однако при застывании пропиточной массы она дает усадку, что снижает ионизирующее напряжение и электрическую прочность конденсатора; в связи с этим воздействие перенапряжений на замороженные конденсаторы, пока они еще не успели разогреться, может привести к их пробое. Таким образом, конденсаторы, пропитанные пентахлордифенилом (ПХД), должны применяться в закрытых помещениях. Для улучшения морозостойкости было предложено снижать вязкость ПХД добавлением к нему в качестве растворителей трихлорбензола $C_6H_3Cl_3$ или тетрахлорэтиленбензола $C_8H_6Cl_4$.

В СССР ПХД, разбавленный трихлорбензолом, был предложен под названием совтол для заливки взрывобезопасных трансформаторов. Разбавленный ПХД находит себе известное применение

в конденсаторостроении, но в настоящее время основным типом хлорированной массы за рубежом стал трихлордифенил: $C_{12}H_7Cl_3$ (ТХД), имеющий по сравнению с ПХД более высокие значения ионизирующего напряжения (см. рис. 92) и более низкую температуру застывания. Формально она равна $-18^\circ C$, но это значение показывает только ту температуру, когда вязкость массы возрастает настолько, что она уже не выливается из стандартной пробирки. Фактически полное отвердевание массы, когда падает ее ϵ_n и снижается $E_{пр}$ происходит при более низкой температуре, порядка $-40^\circ C$; это позволяет в европейских условиях и в условиях США применять конденсаторы, пропитанные ТХД, на открытом воздухе. Для ряда районов СССР и для такой северной страны, как Канада (где особенно наглядно была показана необходимость замены ПХД менее вязким продуктом), желательно иметь, кроме ТХД, и более морозостойкие хлорированные жидкости. Поэтому, кроме новых вариантов ПХД и ТХД с улучшенными свойствами (в отношении уточнения содержания связанного хлора и лучшего удаления загрязнений), разработанных нашими химиками под марками МГ50 и МГ35, были получены продукты МГ45 и МГТ45 с температурами застывания -45 и $-60^\circ C$. За рубежом также разрабатываются улучшенные марки хлордифенилов. Во Франции начат выпуск пиралена 1500, в состав которого в смеси с другими хлордифенилами введен 2,4'-дихлордифенил, обладающий повышенным дипольным моментом. Этот пирален имеет точку застывания несколько ниже, чем у ТХД, и отличается высокой ϵ_n : 6,3 при $20^\circ C$ и 7,6 при $-35^\circ C$ (50 гц). Пирален 1460, содержащий разбавитель — трихлорбензол, имеет точку застывания $-50^\circ C$ и делается хрупким лишь при $-75 \div -80^\circ C$. При 50 гц его ϵ_n начинает снижаться лишь при $-60^\circ C$. Температурные зависимости ϵ_n и $tg \delta_n$ для четырех типов пиралена при двух значениях частоты приведены на рис. 216. В СССР был разработан хлорированный продукт с повышенной полярностью — и и т р о с о в о л, представляющий собой смесь 83% совола

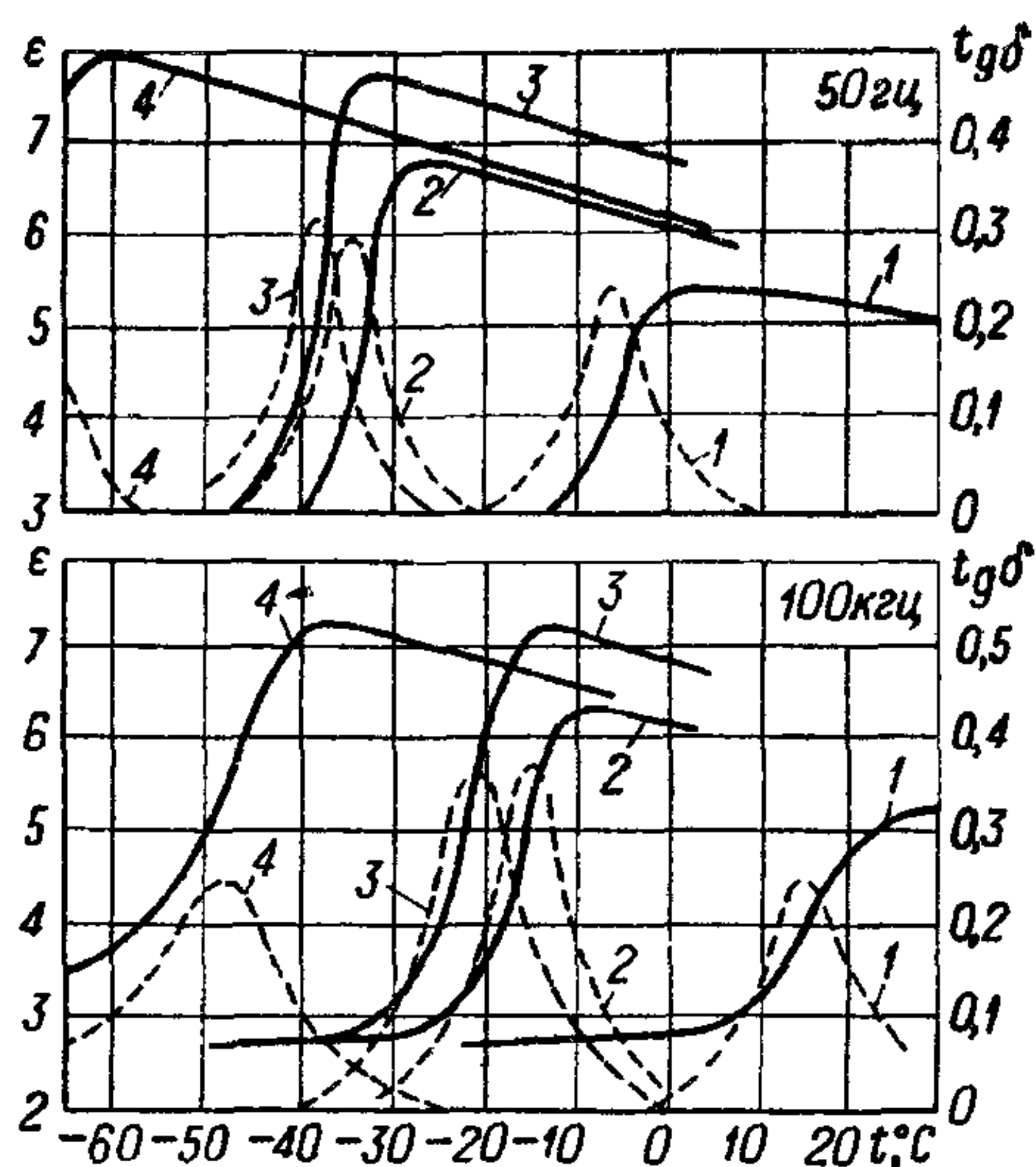


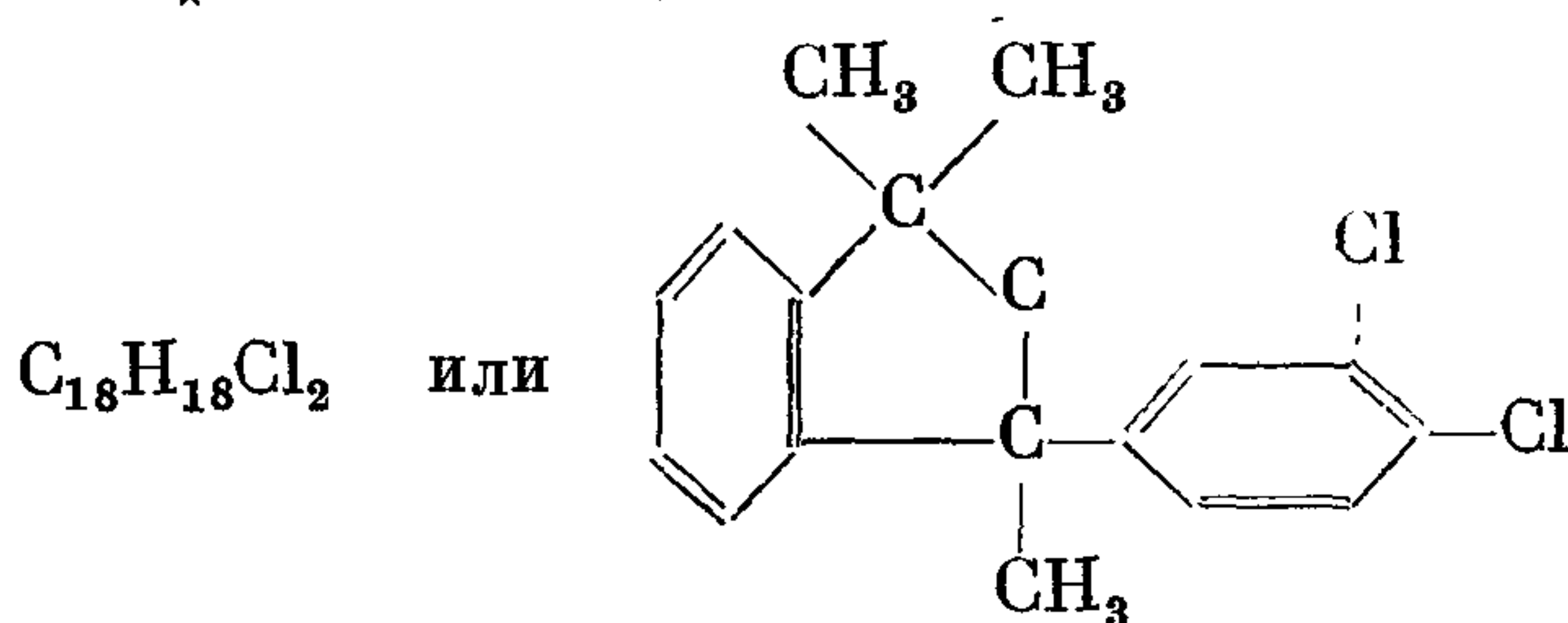
Рис. 216. Зависимость диэлектрической проницаемости (сплошные кривые) и угла потерь (прерывистые) от температуры для четырех сортов пиралена: при частоте 50 гц и 100 кГц.

1 — 1476 (ПХД); 2 — 1499 (ТХД); 3 — 1500; 4 — 1460.

(ПХД) с 13 % полярной присадки — альфанитронафталина. Нитро-соединение имеет $\epsilon_n = 8,0 \div 8,3$, но его $\operatorname{tg} \delta_n$ заметно повышен, а ρ снижено по сравнению с другими хлорированными массами (табл. 20). Этот вид пропиточной массы применяется для пропитки некоторых типов конденсаторов постоянного и импульсного напряжения с большой удельной емкостью и ограниченным интервалом рабочих температур.

Замена масла хлорированной массой с $\epsilon_n \approx 5$ при той же толщине диэлектрика позволяет повысить емкость и реактивную мощность силового конденсатора примерно на 50%. Учитывая повышенную устойчивость хлорированной пропиточной массы к нагреву и действию поля, можно получить дополнительное улучшение удельных характеристик за счет повышения $E_{\text{раб}}$. Практически современные силовые конденсаторы, пропитанные хлорированными жидкостями, имеют удельную реактивную мощность на единицу объема в 2—3 раза выше, чем это удавалось получать при пропитке маслом. Рабочая температура конденсатора при хлорированной пропитке доходит до 90° С. Надо иметь в виду, что внедрение хлордифенилов связано с известными трудностями. Прежде всего надо отметить токсичность этих материалов, требующую уделять достаточное внимание вопросам охраны труда. Далее хлордифенилы чувствительны к загрязнениям, что требует общего повышения культуры производства и специального подбора конструктивных материалов конденсатора, используемых в контакте с пропиточной массой. При изготовлении бумажных конденсаторов, пропитанных хлордифенилом, надо применять специальную бумагу с пониженными потерями и весьма чистую алюминиевую фольгу, лишенную следов смазки.

Кроме использования хлордифенилов возможно применение и иных хлорированных продуктов. В США был опробован продукт под названием IN420, представляющий собой д и х л о р - т р и м е т и л ф е н и л и н д а н:

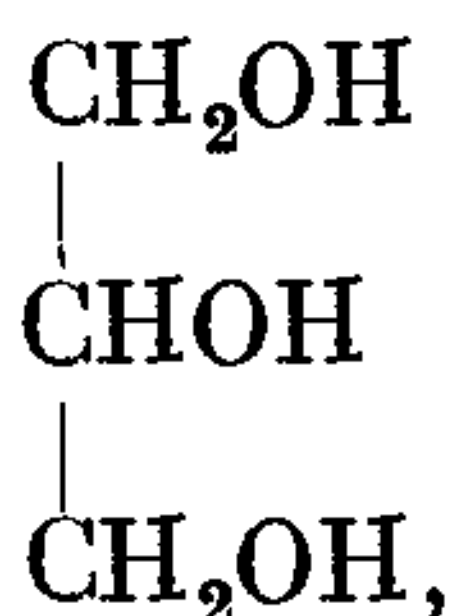


Этот материал по температуре застывания и основным электрическим характеристикам близок к ПХД, но отличается от него меньшей токсичностью и лучшей устойчивостью при постоянном напряжении. Аналогичный материал был изучен и в СССР, но пока не получил распространения.

Можно получить жидкие полярные диэлектрики при обработке органических соединений не только хлором, но и другими галои-

дами, например фтором. В США была разработана полярная фторированная жидкость под названием RFE-774. Это — фторированный эфир, имеющий формулу $C_{20}H_{14}F_{24}O_4$. При 50 гц и температуре $-70^{\circ}C$ величина ϵ_n для этой жидкости составляет 7,1 и пропитанные ею конденсаторы при $-60^{\circ}C$ имеют емкость на 50% выше, чем аналогичные конденсаторы, пропитанные хлордифенилом. Частотная зависимость ϵ_n и $tg \delta_n$ этой жидкости показаны на рис. 217. Как и другие фторированные продукты, жидкость RFE-774 достаточно дорога, что, видимо, ограничит возможности ее широкого применения.

Определенный интерес для конденсаторного производства представляет касторовое масло — полярная жидкость, получаемая из семян клещевины путем горячего прессования или экстракции. Основной составной частью этого масла являются глицериды рицинолевой кислоты $C_{17}H_{32}ON \cdot COON$. Эта кислота имеет одну двойную связь, т. е. является предельным соединением, а, кроме того, в отличие от органических кислот, содержащихся в других растительных маслах, имеет в своем составе гидроксильную группу —ОН (оксикислота), что увеличивает ее полярность. Глицерин представляет собой трехатомный спирт:



который поэтому может присоединить один, два или три остатка рицинолевой кислоты; в касторовом масле в основном содержатся триглицериды. При современных методах очистки касторового масла для него можно получать при $20^{\circ}C$ значения ρ порядка $10^{12} \text{ ом} \cdot \text{см}$, что позволяет изготавливать бумажные конденсаторы постоянного напряжения с рабочей температурой до $85^{\circ}C$. За счет образования тонкой твердой пленки на обкладках при полимеризации масла в электрическом поле (см. рис. 97) рабочую напряженность поля можно повысить, что вместе с повышенным значением ϵ_n дает возможность снизить объем конденсатора до 2 раз по сравнению с пропиткой нефтяным маслом. Недостатком этих конденсаторов является снижение емкости при охлаждении за счет уменьшения ϵ_n (рис. 218); при частоте 50 гц это ограничивает нижний предел температуры значением $-40^{\circ}C$. При обычном пределе, равном $-60^{\circ}C$, снижение емкости достигает 20—25%.

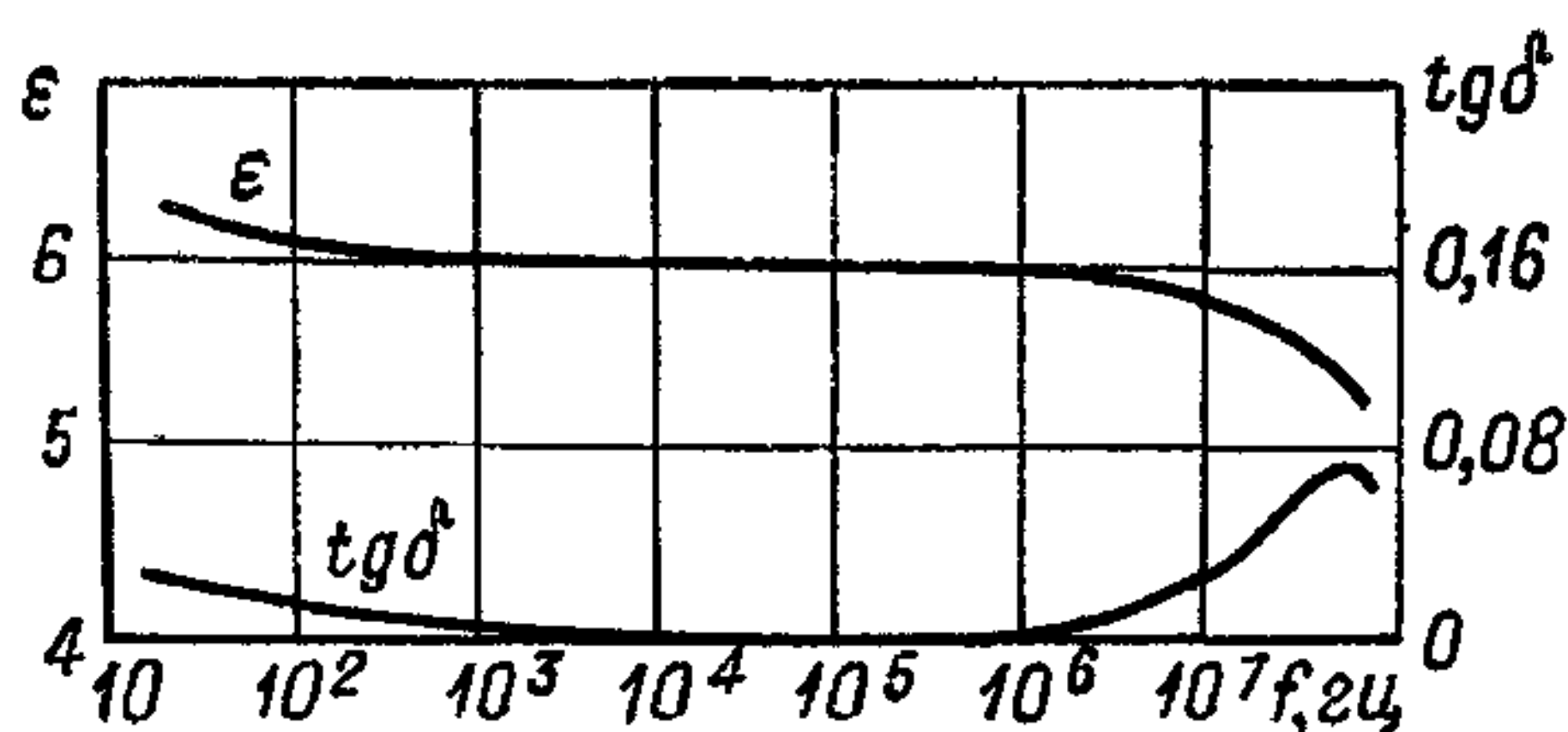


Рис. 217. Зависимость ϵ и $tg \delta$ жидкости RFE-774 от частоты при температуре $20^{\circ}C$.

Касторовое масло пригодно для пропитки не только конденсаторов постоянного напряжения, но и импульсных при небольшой частоте следования импульсов. Применение этого масла при переменном напряжении нецелесообразно из-за увеличенного $\operatorname{tg} \delta$. Новым типом полярной жидкости является цианоэтилсахароза $\text{C}_{34}\text{H}_{46}\text{N}_8\text{O}_{11}$, имеющая резко повышенную $\epsilon_{\text{п}} \approx 35$. Большие потери и низкое удельное сопротивление ограничивают широкую

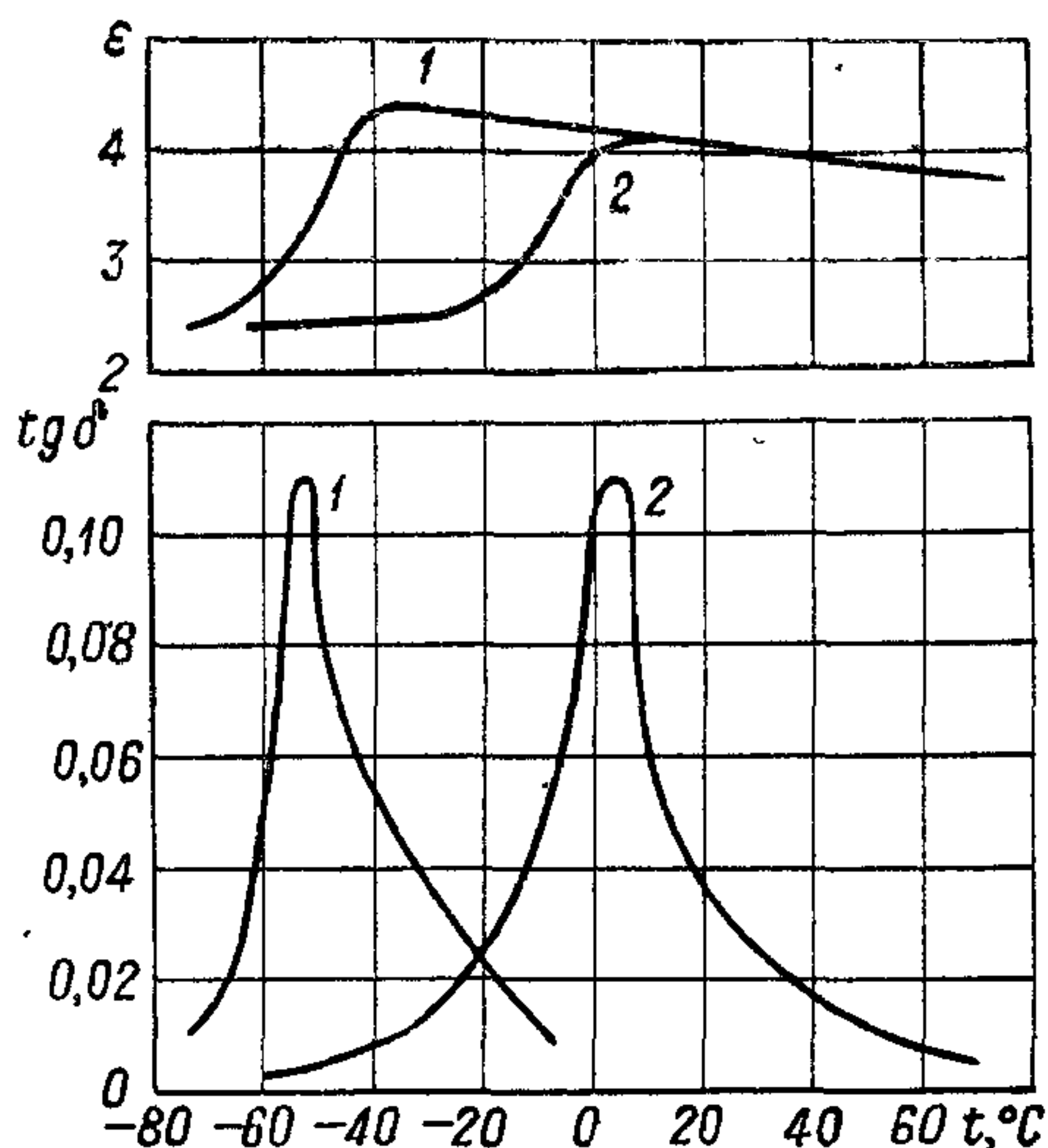


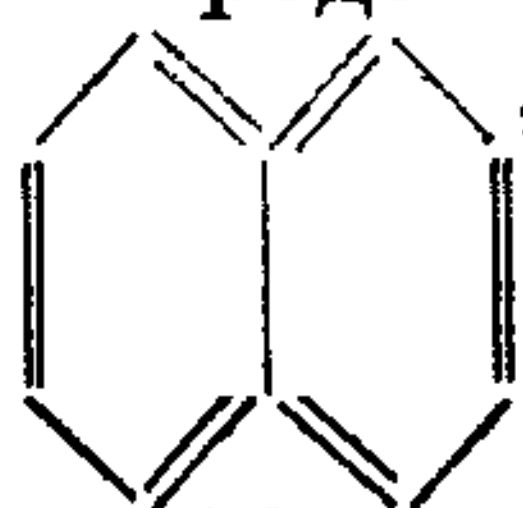
Рис. 218. Зависимость диэлектрической проницаемости (вверху) и угла потерь (внизу) от температуры для касторового масла при двух значениях частоты:

1 — 50 гц; 2 — 1 Мгц.

возможность использования этого интересного материала.

Твердые полярные воскообразные вещества, как и неполярные вещества этого же типа, характеризуются большой усадкой, как снижающей возможный выигрыш в емкости, так и ухудшающей электрическую прочность конденсатора, а потому применение их ограничено. Первым из этой группы материалов появился полихлорнафталин (галовакс — в США, нибрен — в ФРГ и ЧССР, восколь — в Польше), который находил у нас применение в производстве автомобильных конденсаторов, а также и некоторых типов низковольтных радиоконденсаторов.

Этот продукт представляет собой смесь хлоридов нафталины: C_{10}H_8 или



талины: $\text{C}_{10}\text{H}_5\text{Cl}_3$ ($t_{\text{пл}} = 80^\circ \text{C}$) и тетрахлорнафталины: $\text{C}_{10}\text{H}_4\text{Cl}_4$ ($t_{\text{пл}} = 130^\circ \text{C}$) и их изомеров. По сравнению с парафином пропитка хлорнафталином дает повышение емкости на 25—30% и повышение рабочей температуры от 45 до 65—70°C. Недостатками этого материала являются его токсичность и склонность к разложению при постоянном поле (как и в случае хлордифенилов); в связи с этим в СССР он вышел из употребления. За рубежом, в частности в ЧССР и в Польше, он еще находит себе применение для пропитки менее ответственных типов бумажных конденсаторов; при этом его стабилизируют добавкой атрахинона (§ 36). До войны в США начал применяться полярный твердый продукт, полученный путем гидрогенизации (насыщения водородом) касторового масла и называвшийся опалвакс. У нас аналогичный

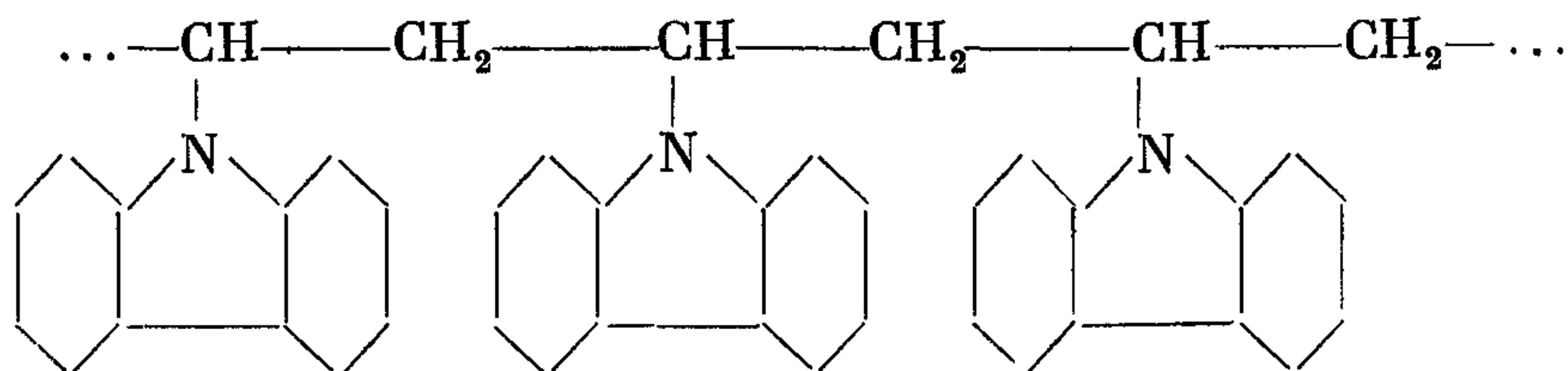
продукт был получен под названием о л е о в а к с. Высокая ϵ_n этого продукта позволяла увеличить емкость конденсаторов по сравнению с пропиткой парафином в 1,75—2 раза. Вместе с тем этот продукт не нашел у нас практического применения благодаря сильной зависимости ϵ_n от температуры, снижению ϵ_n с частотой и заметно увеличенному $\operatorname{tg} \delta$ конденсаторов.

В ФРГ разработана новая твердая полярная воскообразная масса под названием л а н о с т е р о л. Эту массу получают из жира овечьей шерсти, и она представляет собой, по-видимому, высший циклический спирт, выделяемый при расщеплении жира и отделении его кислотной части. Несколько уступая олеоваксу по величине ϵ_n , ланостерол имеет более высокую температуру плавления и бóльшую стабильность емкости с температурой, а также меньшие потери. Все же при пропитке этой массой $\operatorname{tg} \delta$ конденсаторов несколько увеличивается. Емкость у таких конденсаторов изменяется во времени также больше, чем у обычных конденсаторов.

Основное преимущество перечисленных здесь полярных воскообразных веществ — выигрыш в удельной емкости при изготовлении менее ответственных бумажных конденсаторов негерметической конструкции.

В настоящее время для пропитки бумажных конденсаторов постоянного напряжения, в основном небольшой емкости с повышенной н а г р е в о с т о й к о с т ь ю (до 100—125° С), начинают применять п о л и м е р и з у ю щ и е с я с м о л ы и п о л и э ф и р ы. Для пропитки используется мономер в виде жидкости или легкоплавкого твердого вещества; пропитанные мономером секции подвергают нагреву при необходимой температуре, что вызывает превращение мономера, заполнившего поры бумаги, в полимер с соответствующим значительным повышением его температуры размягчения. При этом усадка, обусловленная процессом полимеризации пропиточной массы, резко понижена в сравнении с усадкой воскообразных веществ (обычно порядка 2—5%). Это повышает электрическую прочность, хотя и не в такой мере, как при пропитке жидкими диэлектриками. Поэтому и при этом виде твердой пропитки рабочее напряжение конденсатора при постоянном токе обычно не превышает 1000—1500 в.

За рубежом нашел известное применение п о л и в и н и л - к а р б а з о л (ПВК), мономер которого: $(C_8H_4)_2NCH=CH_2$ имеет температуру плавления 60—70° С. После «запекания» пропитанных конденсаторов в результате процесса полимеризации образуется высокомолекулярный поливинилкарбазол, имеющий структуру:



и температуру размягчения порядка $140-150^{\circ}\text{C}$. Высокое ρ_y ПВК позволяет повысить постоянную времени бумажных конденсаторов примерно в 10 раз по сравнению с пропиткой маслом. Это дает возможность повысить рабочую температуру конденсатора (см. рис. 211). При опробовании ПВК в СССР было установлено, что в стадии мономера он является токсичным и может вызывать опасные кожные заболевания; в связи с этим от его внедрения пришлось отказаться.

В рекламах зарубежных фирм можно найти упоминание ряда пропиточных масс аналогичного типа с фирменными названиями:

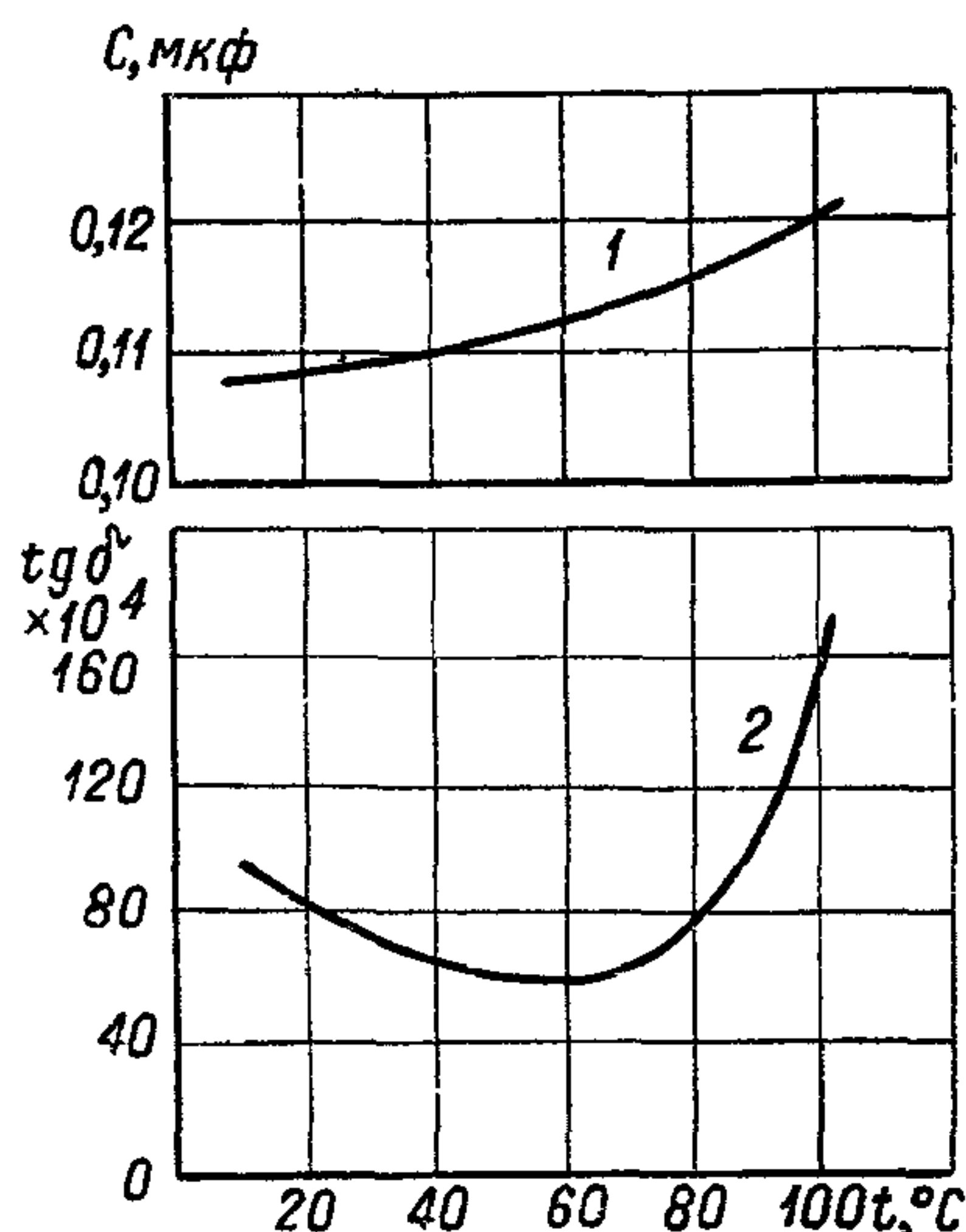
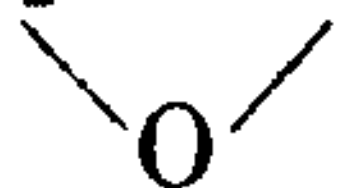


Рис. 219. Зависимость емкости (1) и угла потерь (2) бумажных конденсаторов, пропитанных эпоксидной смолой, от температуры (частота 1 кГц).

пермафил, аэролен, викан, миракл Х, НСХ и т. д.; имеются также указания, что для пропитки ряда типов конденсаторов используются полимеризующиеся смолы и полиэфир. В отношении массы НСХ отмечается, что она представляет собой углеводород, обеспечивающий лучшие значения $R_{из}$, $\text{tg } \delta$ и стабильности емкости, чем при пропитке полиэфиром; возможно, что в данном случае для пропитки использован стирол.

В ГДР, ЧССР и Польше нашли себе применение конденсаторы, пропитанные эпоксидной смолой. В этом случае используется упрощенная конструкция без корпуса (тип «дуропласт»). Конденсаторная секция при намотке защищается дополнительным витком толстой фольги, края которой выступают за края секции.

После пропитки эпоксидной смолой эта же смола используется и для заливки обоих торцов, а затем проводится окончательное «запекание». Эпоксидная смола представляет собой линейный полимер, характеризующийся наличием так называемых эпоксидных групп: $\text{CH}_2-\text{CH}-$,



ности эпоксидной смолы и обуславливающих своей реакционной способностью отверждение смолы при добавке отвердителей; последние образуют мостики между линейными молекулами, «сшивая» их в пространственную структуру, обладающую повышенной температурой размягчения. Пропитка исходной смолой с введенным в нее отвердителем (непосредственно перед пропиткой) проводится при умеренном нагреве ($60-80^{\circ}\text{C}$); после пропитки извлеченные из котла секции подвергаются «запеканию»

при 125—150° С. Верхний предел рабочей температуры для конденсаторов, пропитанных эпоксидной смолой, составляет 100° С. Температурная зависимость емкости и $\operatorname{tg} \delta$ конденсаторов с такой пропиткой, изготовленных фирмой «Тесла» (ЧССР), приведена на рис. 219.

В СССР был опробован для пропитки бумажных конденсаторов полиэфирный компаунд МБК (изготавливаемый на основе бутилметакрилата с добавкой касторового масла), который позволил при лучшей технологичности получить характеристики конденсаторов не хуже, чем при пропитке эпоксидной смолой. Можно высказать сожаление о том, что этот вид пропитки еще не внедрен в массовое производство конденсаторов.

Работы по разработке и опробованию новых пропиточных масс как твердого, так и жидкого типа продолжаются. Можно полагать, что в ближайшем будущем существующий ассортимент пропиточных масс, которым располагает современное конденсаторостроение, будет дополнительно расширен.

§ 78. Технология изготовления бумажных конденсаторов

Первой операцией в производстве бумажных конденсаторов является намотка конденсаторных секций, которую проводят на специальных намоточных станках (рис. 220) из лент бумаги и алюминиевой фольги, сматывающихся с рулонов, закрепленных на осях станка; для обеспечения нужного натяжения (0,2—0,5 кг на 1 см ширины бумаги) используют специальные тормозные устройства. Осевое расположение рулона можно регулировать, чтобы обеспечить совпадение краев бумажных лент и нужную закраину между краями лент бумаги и фольги. Намотка конденсаторной секции ведется на оправку, вставленную в отверстие в шпинделе станка; оправка должна иметь устройства для закрепления концов бумажных лент и фольги в начале намотки. Обычно намоточный станок представляет собой полуавтомат; шпиндель приводится во вращение от электродвигателя, часто через фрикционную передачу во избежание рывков при включении; намотчица заправляет концы бумажных лент в оправку, пускает в ход станок и он ведет намотку автоматически до получения требуемого числа витков, установленного заранее на специальном счетчике, работающем на механическом или электро-механическом принципе; после намотки нужного числа витков станок автоматически останавливается и намотчица обрезает фольгу и бумагу, кроме одной-двух лент, с помощью которых она наматывает перед обрезкой холостые защитные витки. После этого намотчица заклеивает секцию, чтобы избежать ее разматывания, и снимает ее с оправки. Если применяется намотка со скрытой фольгой и вкладными контактами (см. рис. 20, а), то приходится останавливать станок примерно на середине намотки, для того чтобы вложить выводные контакты в

секцию. При намотке секций с выступающей фольгой (рис. 20, б) такая остановка не нужна, т. е. процесс намотки упрощается. Это позволяет создать автоматически действующий станок для намотки одностипных секций при их массовом производстве. Такие станки уже применяются на ряде заводов, выпускающих массовые количества мелких бумажных конденсаторов для электронной техники. Проводится также разработка автоматов для намотки секций силовых конденсаторов.

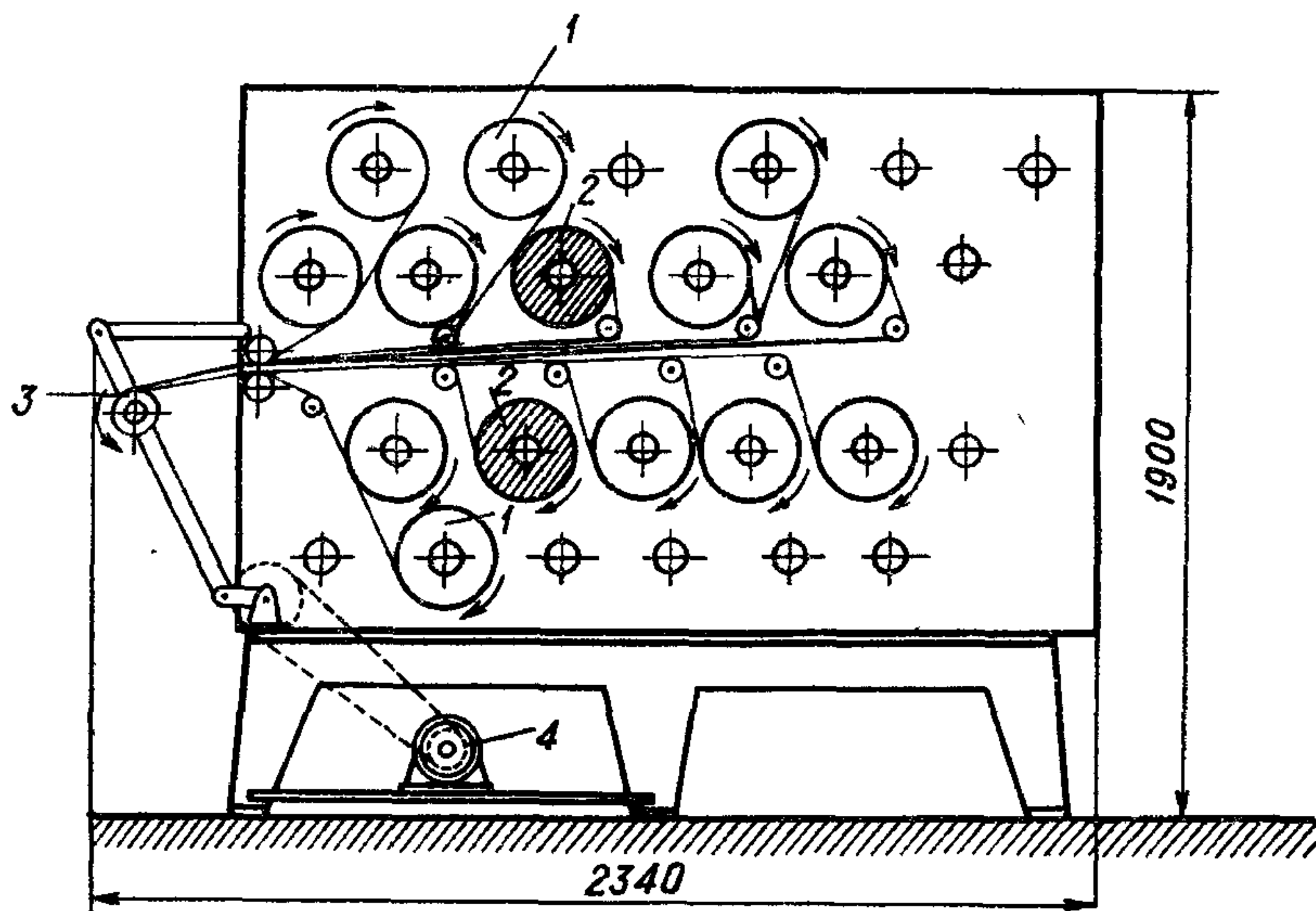


Рис. 220. Схема устройства 24-шпиндельного намоточного станка для намотки секций силовых конденсаторов.

1 — рулоны бумаги; 2 — рулоны фольги; 3 — оправа для намотки; 4 — электродвигатель. Станок заправлен для намотки секций с шестью слоями бумаги между обкладками.

При изготовлении конденсаторов с небольшими значениями номинальной емкости применяют цилиндрические секции, намотанные на оправки малого диаметра (1,5—3 мм) и сохраняющие цилиндрическую форму после снятия с оправки (рис. 221, а); при изготовлении силовых конденсаторов или конденсаторов для электронной техники с высоким рабочим напряжением или большой емкостью применяют плоскостисованные секции (рис. 221, б). В этом случае используется оправа большого диаметра, до 20—60 мм, и снятая с оправки секция сжимается, принимая плоскую форму. Сильно сжатые плоские секции дают несколько большую удельную емкость, чем цилиндрические; такие секции позволяют лучше использовать объем прямоугольного корпуса при сборке конденсатора из нескольких секций; несколько повышается и электрическая прочность, так как меньше толщина зазоров, заполненных пропиточной массой (между слоями бумаги и фольгой).

Число осей на станке должно быть равно:

$$N = 2n + 2, \quad (275)$$

где n — число слоев бумаги между обкладками секции, обычно не более 10, поскольку бумажные конденсаторы высокого напряжения изготавливают из большого числа последовательно соединяемых секций, в которых число слоев бумаги выбирается оптимальным для получения высокой кратковременной прочности при достаточно высокой ионизирующей напряженности (см. рис. 85).

Намотка представляет собой ответственную операцию, в значительной степени влияющую на надежность конденсатора. Брак при намотке (незамеченный обрыв бумажной ленты или фольги, резкие складки и морщины, перекосы лент, вызывающие уменьшение размера закраин и т. п.) может легко стать причиной пробоя одной из секций конденсатора в условиях эксплуатации и вывести его из строя. Поэтому на ряде зарубежных заводов при работе на станках полуавтоматах намотчицы сняты со сдельной работы и переведены на повременную, причем перевыполнение заданной нормы не поощряется, а требуется высокое качество.

Цилиндрические секции после намотки поступают на сборку в корпусах; плоские секции требуют предварительной запрессовки в пакеты, если конденсатор собирается из ряда секций. При этом необходимое количество секций собирается в стопку, которую механически сжимают до заданных размеров (или до заданного удельного давления) и закрепляют металлическими хомутами или изоляционными планками для сохранения размеров и формы (рис. 222). Иногда применяется тугая запрессовка пакета секций прямо в корпус конденсатора без применения хомутов и планок.

Степень сжатия секций характеризуется коэффициентом $k_{зп}$, который определяется отношением номинальной толщины диэлектрика секции nd_1 (где d_1 — толщина одного слоя бумаги) к фактическому расстоянию между обкладками с учетом суммы зазоров между слоями бумаги и фольги $d_{зав}$:

$$k_{зп} = \frac{nd_1}{nd_1 + d_{зав}}. \quad (276)$$

Обычно $k_{зп} = 0,8 \div 0,95$ и его берут выше для конденсаторов постоянного напряжения. Повышенные значения $k_{зп}$ дают повы-

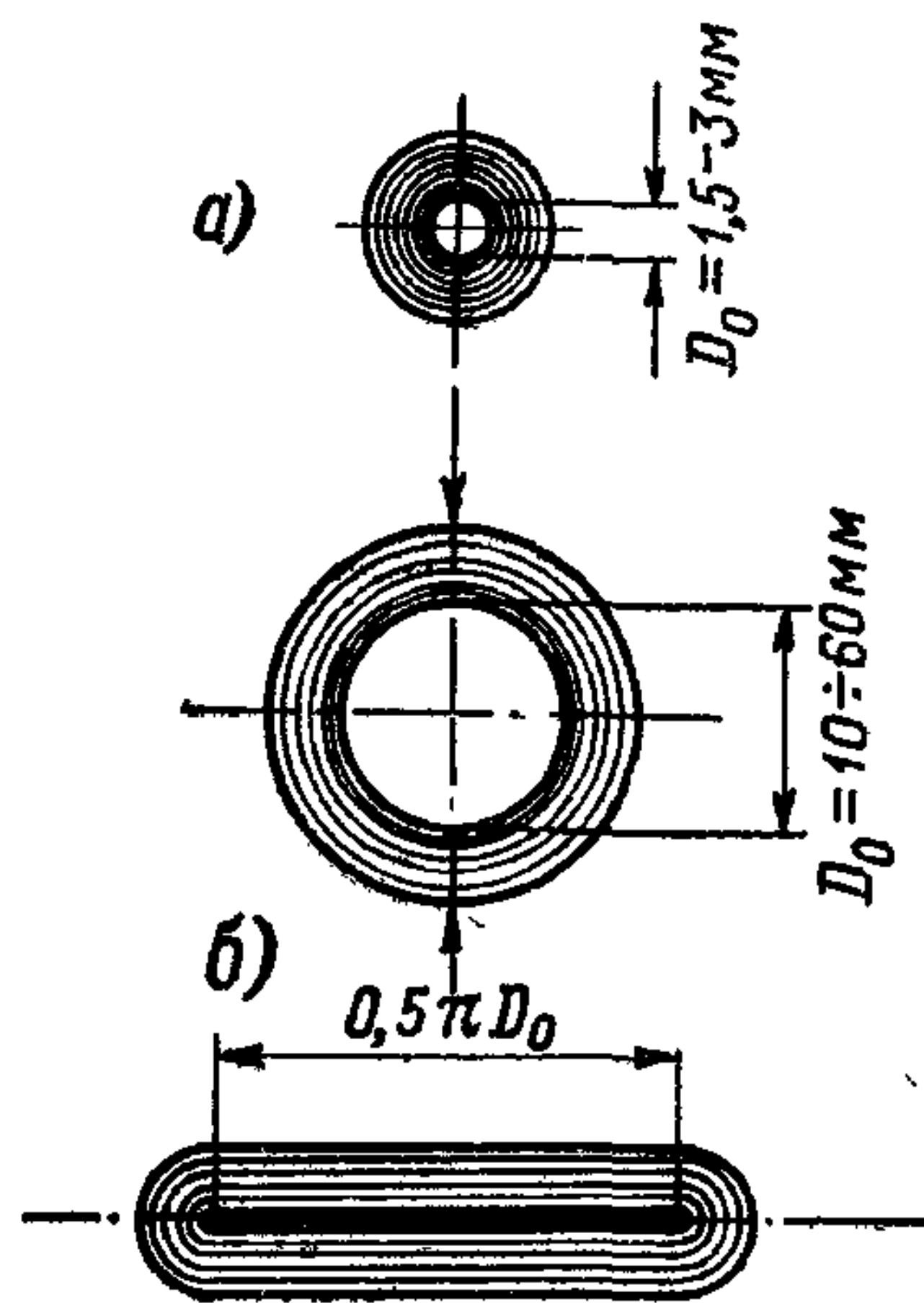


Рис. 221. Поперечное сечение секций бумажных конденсаторов: а — цилиндрическая секция; б — плоская секция.

шенную удельную емкость и повышенную $E_{\text{пр}}$ (если удельное давление при запрессовке не настолько велико, чтобы повредить диэлектрик); при этом, однако, происходит увеличение $\text{tg } \delta$, а также затрудняется и удлиняется процесс сушки конденсатора.

При сборке небольших радиоконденсаторов плоские секции обычно просто вставляют в металлический корпус, применяя для их уплотнения картонные клинья. Очевидно, при этом степень

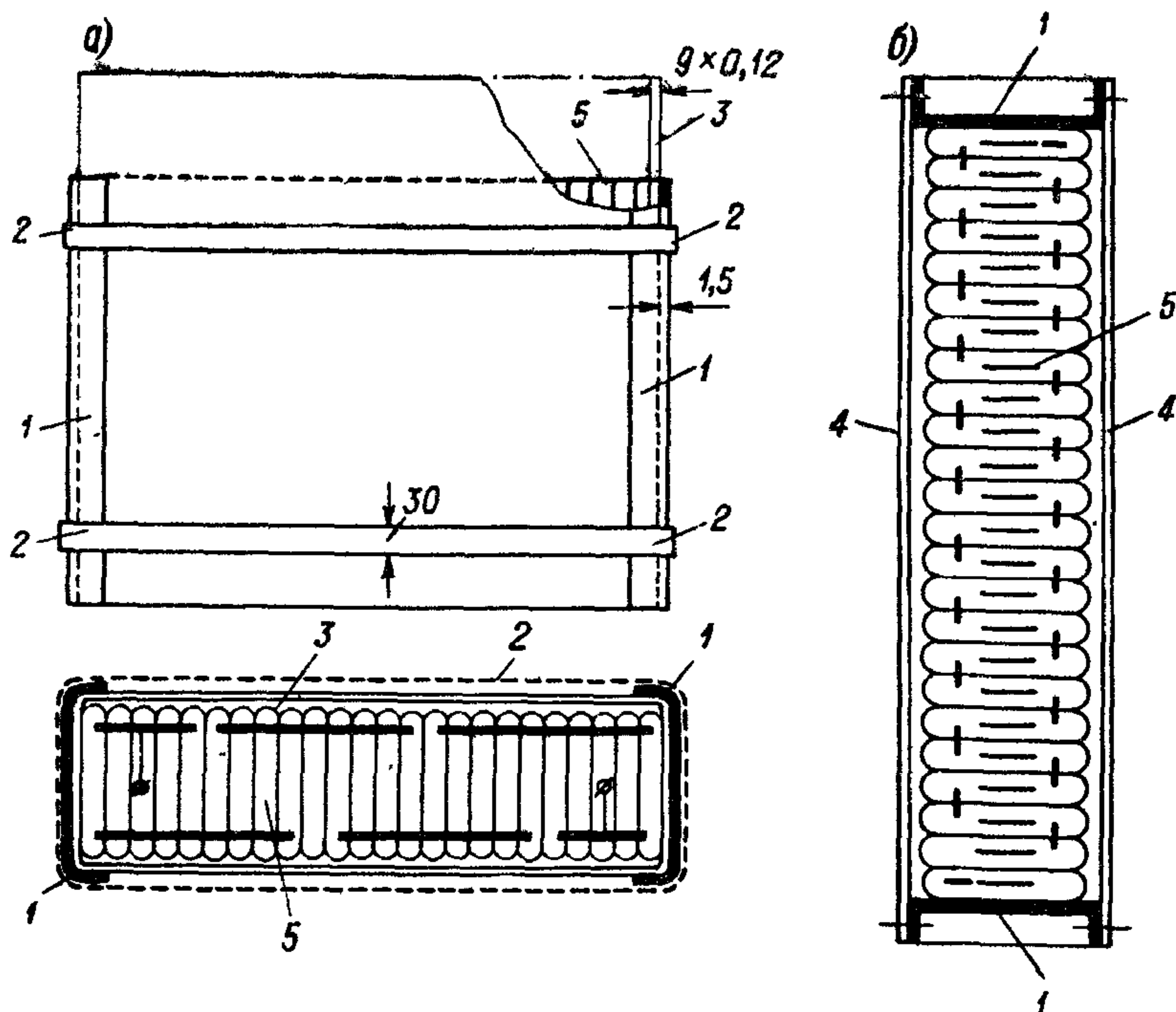


Рис. 222. Схемы пакетов бумажных конденсаторов: а — силовой конденсатор на несколько киловольт, секции соединены в параллельно-последовательные группы; б — импульсный конденсатор на несколько десятков киловольт, секции соединены последовательно.

1 — стяжная щека; 2 — стягивающий стальной бандаж; 3 — изоляция от корпуса; 4 — стягивающая текстолитовая планка; 5 — секции.

сжатия невелика, что несколько ухудшает удельные характеристики.

При использовании твердых (реже — полужидких) масс в производстве небольших бумажных конденсаторов низкого напряжения иногда применяют сушку и пропитку секций до сборки в корпусе; цилиндрические секции сушат и пропитывают в металлических корзинах (сетчатых или перфорированных коробках), а плоские секции — в металлических струбцинах, которые разбирают после окончания пропитки и охлаждения до комнатной температуры. В этом случае твердая масса при своем отвердевании (за счет охлаждения или «запечки» при пропитке смолами) цементи-

рует конденсаторную секцию и последняя сохраняет приданную ей прессовкой плоскую форму.

При использовании жидких пропиточных масс (иногда и при твердых массах) сушка и пропитка производятся после сборки конденсаторных секций в корпусах и припайки или приварки верхней крышки с изоляторами. В последней оставляется отверстие, через которое уходят пары воды при сушке и входит пропиточная масса при пропитке; по окончании пропитки после охлаждения конденсатора до некоторой заданной температуры это отверстие запаивается или заваривается. При изготовлении небольших конденсаторов со стеклянными проходными изоляторами (рис. 123, а—в) в качестве пропиточных отверстий используются зазоры между стенкой трубки изолятора и выводным проводником, пропущенным через эту трубку. Впаивание проводника в трубку производят при этом после пропитки, одновременно с припайкой выводного лепестка.

Пропитка бумажного конденсатора после его сборки в герметизированном корпусе с немедленной запайкой пропиточного отверстия после окончания пропитки сводит к минимуму возможность поглощения пропитанными секциями влаги из окружающего воздуха и обеспечивает повышение надежности конденсатора в эксплуатации.

Процесс сборки секций в корпусах для повышения производительности труда обычно осуществляется на конвейерах с расчленением сборочных операций между отдельными рабочими сборочной бригады. Процессы впаивания изоляторов в крышки и припайвания крышек к корпусам после сборки в них секций в производстве массовых типов небольших бумажных конденсаторов механизированы с применением высокочастотных генераторов для разогрева спаиваемых частей конденсатора.

Сушка и пропитка бумажных конденсаторов являются наиболее ответственными этапами технологии, от которых в сильной степени зависит качество готовых конденсаторов. Основной задачей сушки является максимальное удаление воды, содержащейся в конденсаторе. Количество воды, остающееся в бумаге после сушки до установившегося состояния, является функцией двух основных факторов: температуры и давления в сушильном баке (рис. 223).

Когда содержание воды в бумаге снизится до установившейся величины $q_{ост}$, соответствующей заданным значениям t и p , то

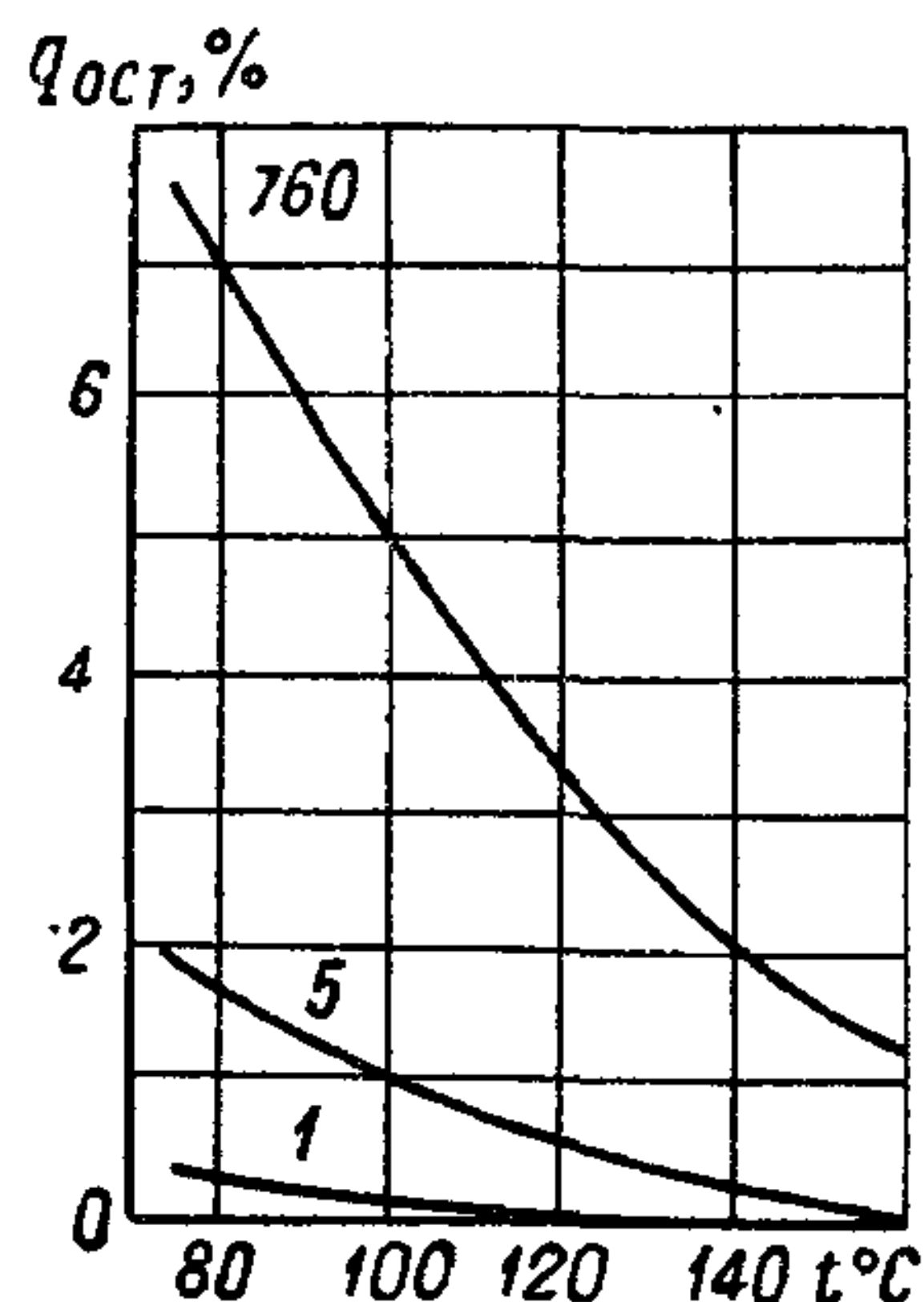


Рис. 223. Зависимость остаточной влажности в конденсаторной бумаге от температуры сушки при различных значениях давления в сушильной печи. Цифры у кривых — давление в мм. рт. ст.

дальнейшее увеличение времени прогрева при этих же значениях t и p уже не дает дополнительного снижения $q_{\text{ост}}$; улучшение степени сушки может быть достигнуто только за счет дополнительного повышения температуры или улучшения вакуума, т. е. снижения остаточного давления p . Таким образом, для максимального ускорения сушки и максимального удаления влаги из бумажного конденсатора сушку его надо вести при максимально возможной температуре и минимально возможном остаточном давлении в сушильном баке.

Для того чтобы улучшить использование вакуумного оборудования, обычно (перед окончательной вакуумной сушкой в вакуумном сушильном баке) проводят предварительную сушку в отдельной сушильной печи при атмосферном давлении; при этом из бумаги удаляется значительная часть содержащейся в ней влаги и окончательная вакуумная сушка, при которой удаляется только влага, оставшаяся после атмосферной сушки, может быть значительно ускорена.

Обычная температура сушки при а т м о с ф е р н о м д а в л е н и и составляет $100\text{—}110^\circ\text{C}$, т. е. близка к точке кипения при нормальном давлении. При этой температуре на воздухе уже могут идти окислительные процессы, а потому ранее опасались повышать температуру предварительной сушки выше этого предела; теперь, когда была показана польза от умеренного окисления бумаги в отношении поведения конденсаторов при постоянном напряжении (§ 76), в производстве небольших конденсаторов для электронной техники принят режим нагрева при предварительной сушке 135°C , 16 ч. Более длительный прогрев при этой температуре для больших силовых конденсаторов уже может вызвать ухудшение угла потерь (рис. 209, б), а потому в производстве силовых конденсаторов температуру предварительной сушки сохраняют на прежнем уровне.

Для интенсификации сушки этих конденсаторов стремятся ускорить их прогрев до заданной температуры, применяя сушку с внутренним обогревом обкладок конденсатора током частотой 50 гц (что требует применения добавочных вкладных контактов и перепайки схемы соединения выводов после окончания сушки) или током звуковой частоты, что дает еще больший эффект в смысле ускорения времени сушки, но требует применения специального оборудования (мощного машинного генератора звуковой частоты). По данным М. М. Морозова, если обычная предварительная сушка продолжается 48—72 ч (в зависимости от габаритов), то сушка с подогревом при частоте 50 гц занимает всего 5—6 ч, а при подогреве при частоте 8 кгц время сушки снижается до 1,5—2 ч.

При выборе температуры для о к о н ч а т е л ь н о й в а к у у м н о й с у ш к и надо учитывать, что благодаря высокому вакууму в сушильно-пропиточном баке окислительные процессы резко ослаблены. Пиролитическое разложение бумаги, как было указано выше, может иметь место при температурах выше 200°C ,

но гидролитическое разложение, которое можно ожидать при наличии остатков влаги в бумаге и следов кислот, делается опасным и при меньших температурах; по-видимому, опасным пределом при длительной вакуумной сушке является температура порядка 150°C . Учитывая недостаточную равномерность распределения температуры по объему больших сушильно-пропиточных баков, среднее значение температуры в баке обычно не поднимают выше 140°C , хотя в одном американском сообщении указывалась температура сушки 165°C .

Остаточное давление при вакуумной сушке желательно брать как можно ниже. Формула (265) показывает, что снижая давление при сушке, можно существенно снижать $\text{tg } \delta_k$, а следовательно, и потери в конденсаторе, что очень важно для конденсаторов переменного напряжения. Кроме того, при лучшем удалении влаги из бумажного диэлектрика повышается $E_{\text{ион}}$ в соответствии с повышением $\rho_{\text{об}}$ диэлектрика (и постоянной времени конденсатора), обусловленным удалением влаги (рис. 224). Это важно при работе конденсатора как при переменном, так и при постоянном напряжении.

Для конденсаторов постоянного напряжения повышение постоянной времени при улучшении сушки за счет снижения остаточного давления имеет большое значение и потому, что при высокой рабочей температуре постоянная времени определяет границу теплового пробоя.

В производстве небольших бумажных конденсаторов для постоянного напряжения, когда опасность ионизации невелика, применяют сушку при остаточном давлении порядка $0,3\text{—}0,5 \text{ мм рт. ст.}$. В производстве больших силовых конденсаторов, рассчитанных на работу при переменном напряжении, уже давно применялись давления ниже $0,1\text{—}0,01 \text{ мм рт. ст.}$. Современные передовые зарубежные фирмы перешли к еще меньшим давлениям, порядка $10^{-3}\text{—}10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$, причем на котлах достаточно большого объема, порядка 10 м^3 . Для проверки степени уплотнения вакуумных котлов (баков) применяют характеристику, называемую скоростью натекания:

$$u_n = \frac{V(p_1 - p_0)}{\tau} [\text{л} \cdot \text{мм рт. ст.}/\text{сек}], \quad (278)$$

где V — объем бака в л и $p_1 - p_0$ — изменение давления в мм рт. ст. в баке за время τ сек.

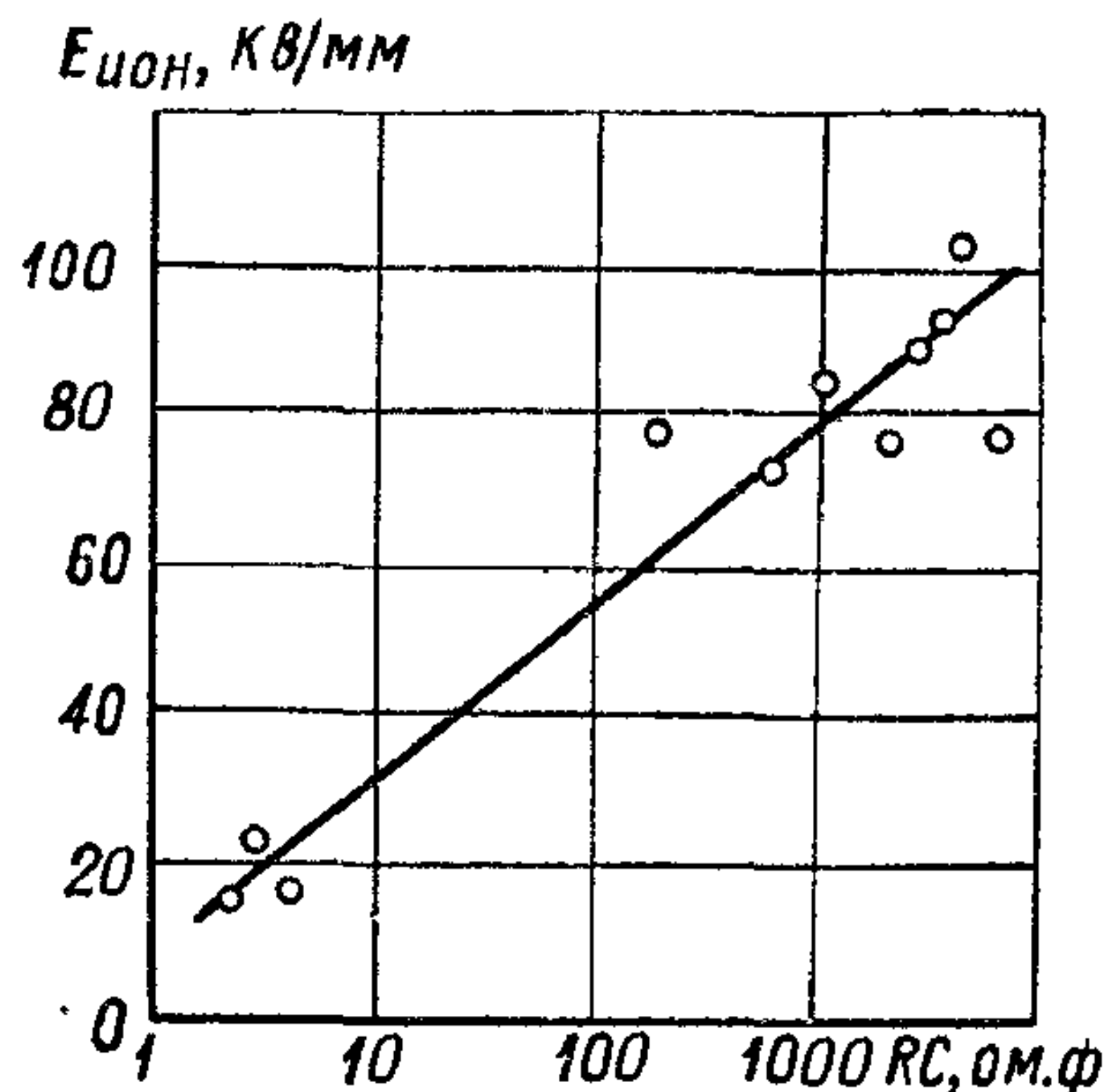


Рис. 224. Увеличение ионизирующей напряженности в бумажном конденсаторе при повышении его постоянной времени в соответствии с удалением влаги из диэлектрика.

В современных больших баках с хорошим уплотнением после откачки холодного бака до 10^{-4} мм рт. ст. и отключения насосов повышение давления до 10^3 мм происходит за 8—10 ч. Если принять объем такого бака равным 10 м^3 (10^6 л) и $p_1 - p_0 = 0,9 \text{ мм рт. ст.}$ за время $\tau \approx 3 \cdot 10^4 \text{ сек}$, то скорость натекания $u_{\text{п}} = 30 \text{ л} \cdot \text{мм рт. ст.} / \text{сек}$.

Для получения высокого вакуума, кроме обычных ротационных насосов, приходится применять пароструйные (диффузионные) насосы в качестве второй ступени понижения давления. Действие таких насосов основано на диффузии газа из откачиваемого объема в струю пара. Сравнение производительности ротационного и диффузионного насосов при различных остаточных давлениях показано на рис. 225. Наглядно видна

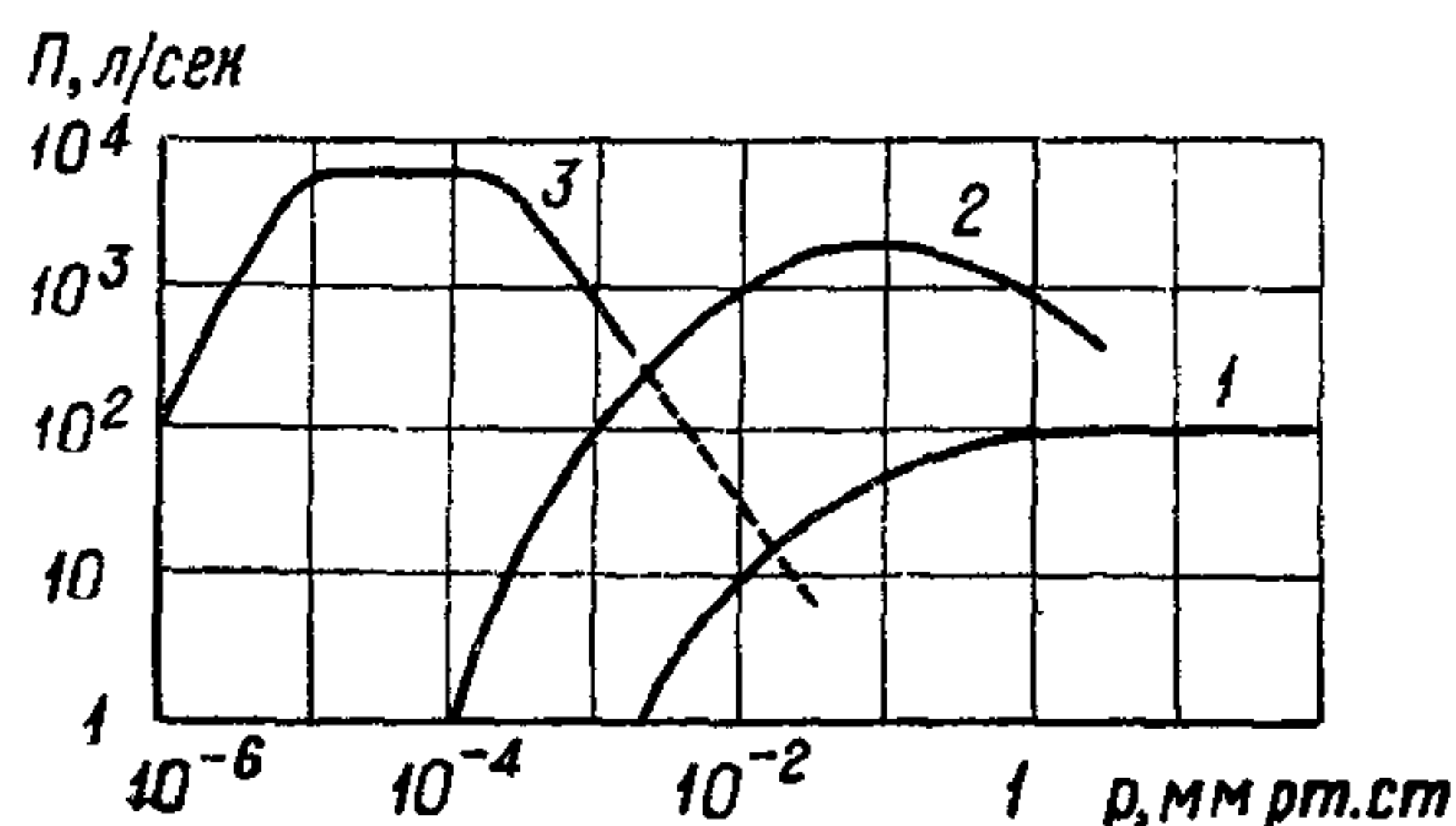


Рис. 225. Зависимость производительности вакуумных насосов от величины остаточного давления в откачиваемом пространстве

1 — ротационный насос; 2 — насос Рутса; 3 — пароструйный насос.

необходимость применения диффузионных насосов при остаточных давлениях порядка 10^2 мм рт. ст. и ниже.

Схема сушильно-пропиточной установки, закупленной заводом А-1 (ПНР) у фирмы Лейбольд (ФРГ) и позволяющей получать остаточное давление до $10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$, показана на рис. 226. Из сборника сырого масла 1 с помощью насоса 2 производится подача масла в устройство для очистки масла адсорбентом 3; далее масло

через фильтр 4 поступает к устройству для обезгаживания. На первой ступени обезгаживания 5, соединенной через уловитель 7 с блоком ротационных насосов 8, остаточное давление равно $0,1 \text{ мм рт. ст.}$, на второй ступени 6, соединенной через уловитель с диффузионным насосом 9, создается давление $0,01 \text{ мм рт. ст.}$ Пройдя через такую обработку, масло скапливается в сборнике 10, откуда после окончания сушки конденсаторов поступает в вакуумную печь 11 по индивидуальным трубкам для каждого конденсатора 12, установленного в печи. Избыток масла, оставшийся в печи, может потом через фильтр 13 снова поступить в сборник 1. Для первой ступени сушки конденсаторов, помещенных в вакуумную печь, применяются блок вакуумных насосов 14 и специальное устройство для улавливания воды 15, на второй ступени вакуумной сушки используется блок вращающихся насосов 16 и диффузионный насос 17. Уловитель воды 15 состоит из камеры собирания воды К (в которую подается холодная вода из трубопровода А), вымораживателя В, снижающего температуру воды в камере до $3-4^\circ \text{ С}$, и блока насосов 14. Уловитель К работает на первой ступени сушки, когда бумага отдает

основное количество влаги; горячие частички водяного пара, поступающие из печи, сталкиваются с частичками холодной воды и конденсируются. При дальнейшем снижении давления, когда температура холодной воды повышается, начинает работать вымораживатель В. Типовая диаграмма сушки на этой установке, показывающая изменение температуры и давления в ходе этого процесса, показана на рис. 227. В данном случае продолжительность процесса сушки составляет около 120—150 ч, что характерно для силовых конденсаторов больших размеров. В производстве маленьких конденсаторов для электронной техники время сушки снижается до 24—48 ч. Об окончании процесса сушки можно судить по установлению постоянства давления в сушильной печи. При этом необходимо пользоваться прибором, указывающим суммарное значение давления остаточного воздуха и паров воды. Компрессионные манометры (вакуумметры), например прибор Мак Леода, для этого непригодны, так как в них пары воды могут конденсироваться; следует применять ионизационные, термопарные и аналогичные им типы вакуумметров, измеряющих суммарное давление.

Основная задача процесса пропитки — заполнение пор в бумаге и зазоров между слоями бумаги и обкладками пропиточной массой для повышения ϵ бумажного диэлектрика и его электрической прочности. Пропитка производится в том же баке, где происходила сушка, и сразу же после окончания последней. Весьма важно, чтобы во все время впуска массы (а также некоторое время после окончания впуска) в сушильно-пропиточном баке поддерживалось возможно меньшее значение остаточного давления, так как это обеспечивает лучшее впитывание массы в поры бумаги. Ход процесса пропитки можно наблюдать по изменению емкости конденсатора во время этого процесса (рис. 228, а). Прекращение возрастания емкости указывает, что при заданных условиях пропитки в поры бумаги вошло

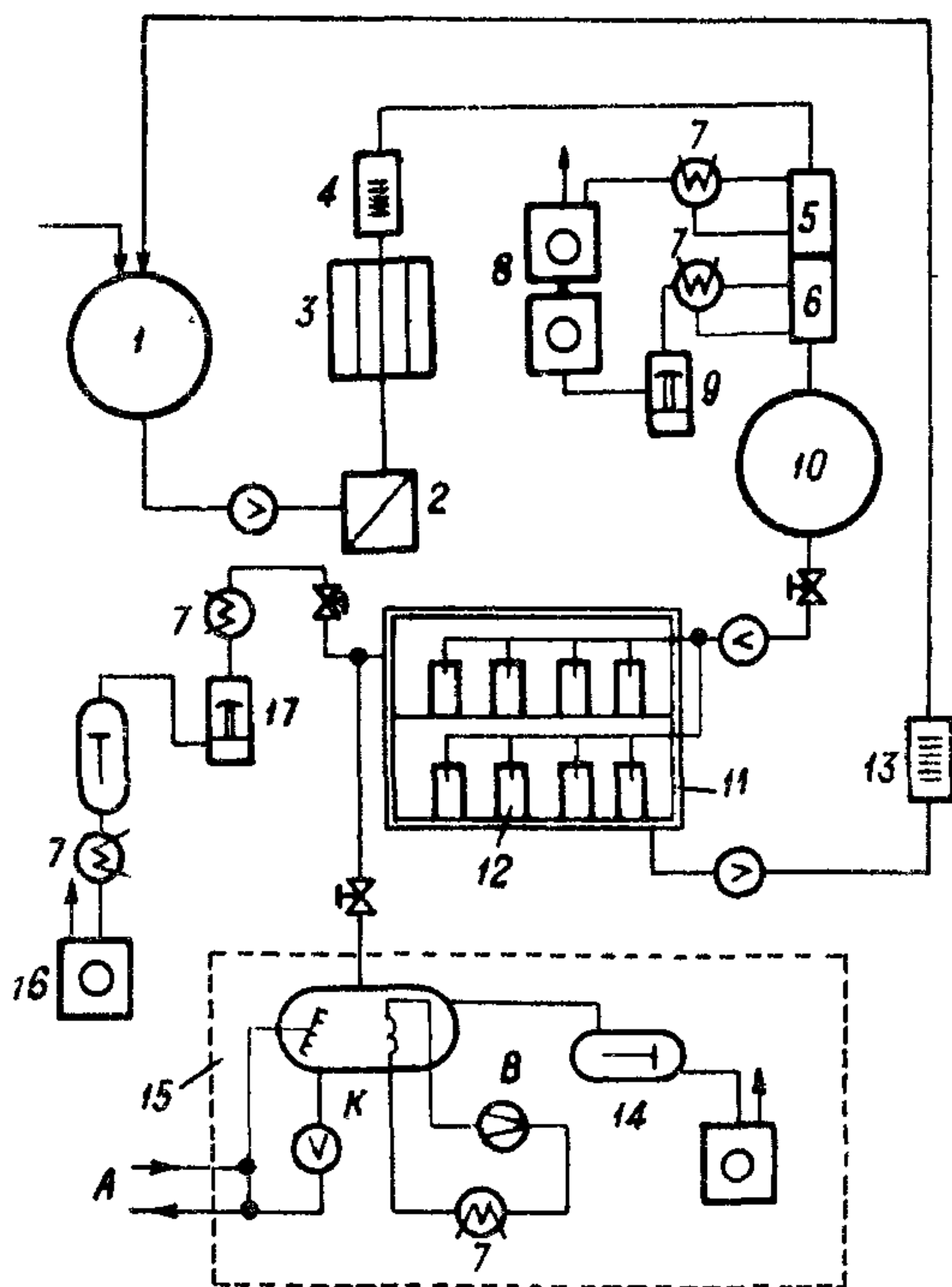


Рис. 226. Схема сушильно-пропиточной установки на заводе А-1 (ПНР) (пояснения — в тексте).

максимально возможное количество массы; дальнейшее увеличение времени пропитки уже не дает эффективных результатов.

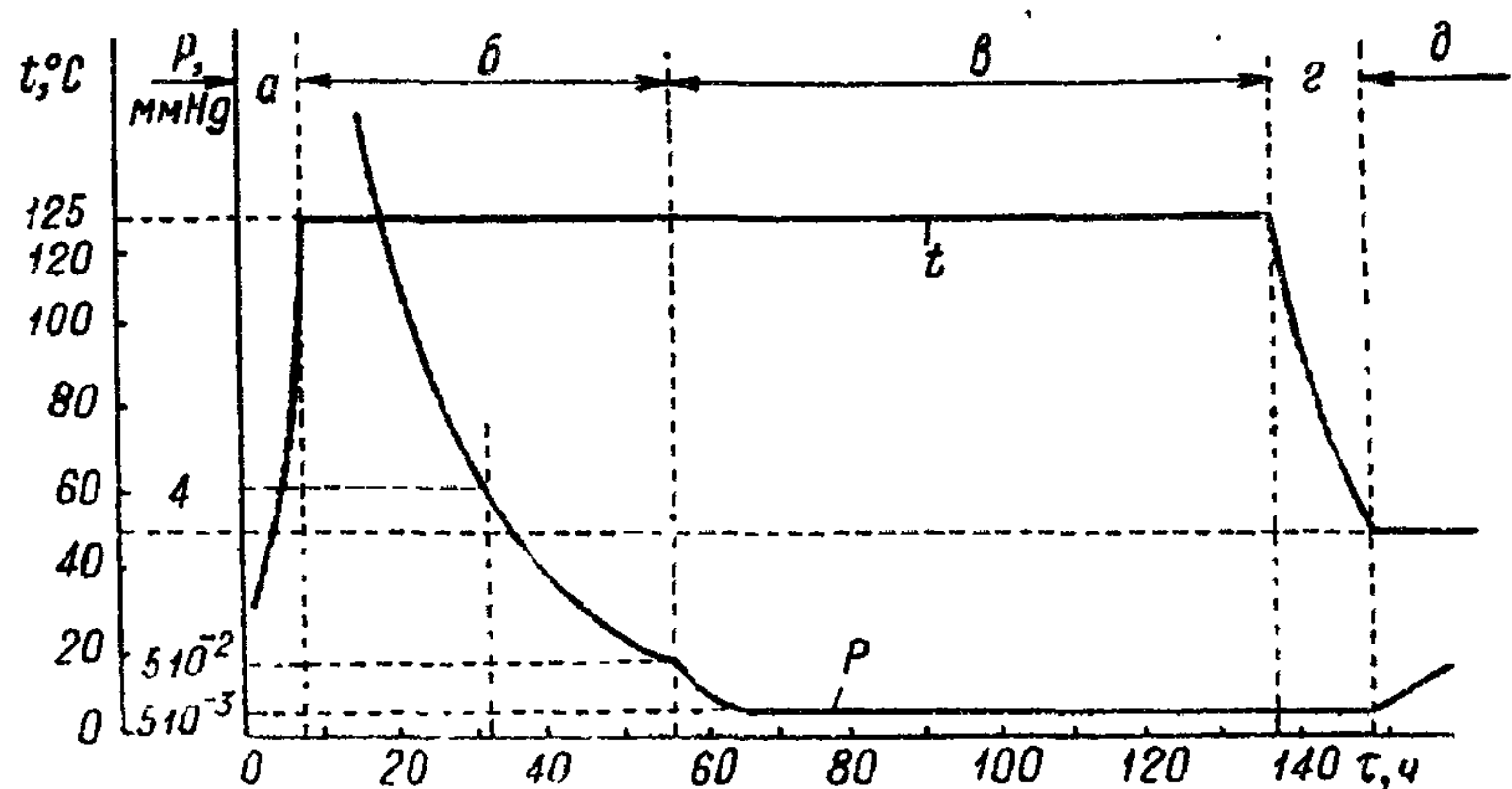


Рис. 227. Типовой процесс сушки бумажных силовых конденсаторов на заводе А-1 (ПНР): а — сушка при атмосферном давлении; б — предварительная вакуумная сушка (первая ступень давления); в — окончательная вакуумная сушка (вторая ступень); з — подготовка к пропитке маслом; д — начало пропитки.

Повышая вакуум в период впуска пропиточной массы, можно заметно улучшить $E_{пр}$ конденсаторов:

Остаточное давление при пуске массы, мм рт. ст.	Среднее значение кратковременной элект- рической прочности, кв/мм
760	135
6	244
0,5	360

При впуске массы в бак давление в нем неизбежно повышается (см. этап «д» на рис. 227) за счет частичного испарения массы; поэтому надо производить впуск массы постепенно, стремясь поддерживать минимально возможное давление. При предварительном обезгаживании массы перед пропиткой желательно добиваться того же значения остаточного давления, которое достигается в конце периода сушки.

При неисправности перепускного вентиля в момент впуска массы может произойти кратковременное соединение бака с атмосферой, что иногда остается незамеченным; следствием этого может быть резкое снижение электрической прочности данной партии конденсаторов. О нарушении вакуума в момент впуска массы можно судить по заметному снижению емкости конденсаторов по сравнению с ее обычным значением.

Температуру массы перед впуском ее в бак с конденсаторами устанавливают с учетом двух важнейших обстоятельств: должна быть получена достаточно малая вязкость массы, чтобы облегчить

ее впитывание в бумагу (вязкость падает с температурой, как показано на рис. 229), и должно быть обеспечено отсутствие замет-

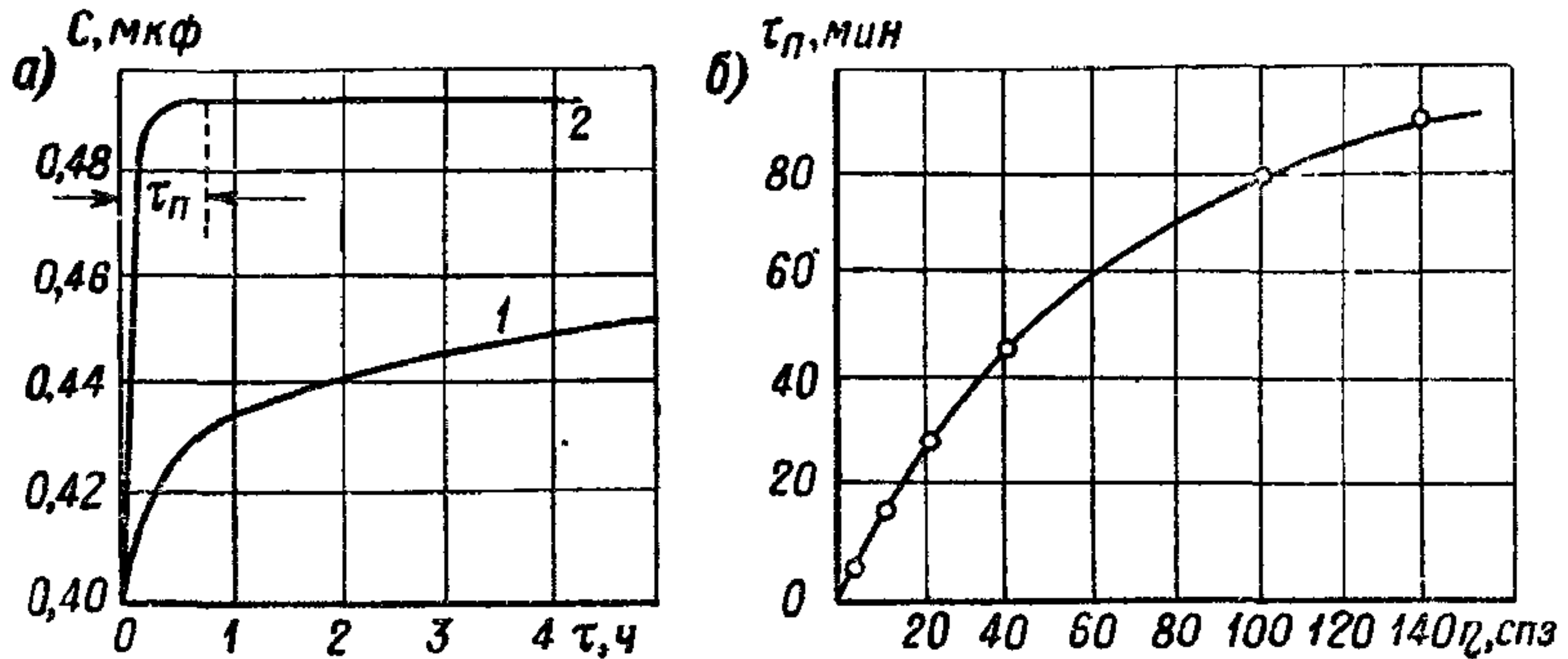


Рис. 228. Влияние вакуума и вязкости пропиточной массы на ход процесса пропитки: а — зависимость емкости от времени пропитки парафином (1 — впуск массы без вакуума; 2 — впуск под вакуумом ($p = 1$ мм рт. ст.)); б — зависимость времени полной пропитки от вязкости пропиточной массы.

ного окисления или химического изменения массы (опасность которых возрастает с повышением температуры). Зависимость времени пропитки, достаточного для получения установившегося значения емкости, от вязкости массы показана на рис. 228, б. Эта зависимость была получена И. В. Новопащенко для небольших конденсаторов в лабораторной печи, а потому дает лишь сравнительную оценку влияния вязкости массы на скорость процесса пропитки.

Для маловязких масел обычно применяют температуру пропитки порядка $70-80^\circ\text{C}$ (иногда даже до 50°C , как на рис. 227); в этом случае приходится снижать температуру в баке после окончания процесса сушки, который ведется при более высоких температурах. Более вязкие жидкости, например касторовое масло и особенно октол, требуют повышения температуры пропитки до $110-120^\circ\text{C}$, чтобы получить достаточное снижение вязкости. Время пропитки значительно меньше времени сушки и даже для больших силовых конденсаторов редко превышает 10–12 ч.

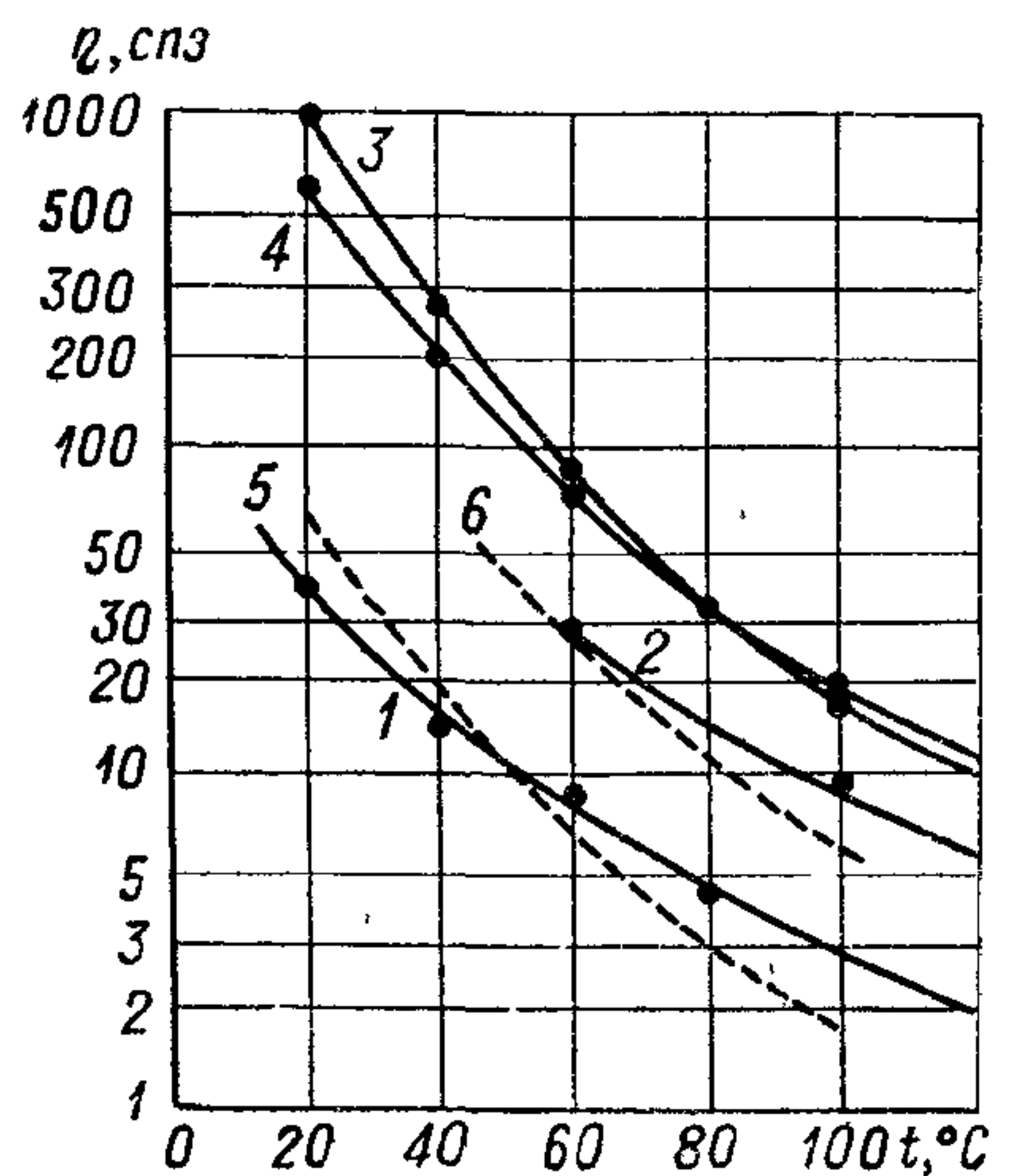


Рис. 229. Зависимость вязкости пропиточных масс от температуры.

1 — конденсаторное масло; 2 — вазелин; 3 — кабельное масло с добавкой полиизобутилена; 4 — касторовое масло; 5 — трихлордифенил; 6 — пентахлордифенил.

После окончания пропитки излишки пропиточной массы спускают из бака¹ и извлекают из него конденсаторы для запайки в них пропиточных отверстий. Вопрос о том, при какой температуре конденсатора надо запаивать пропиточное отверстие, имеет большое значение. Если конденсатор полностью заполнен жидкой массой (без наличия воздушной подушки) и будет запаян при температуре $t_{\text{зап}}$ ниже его максимальной рабочей $t_{\text{макс}}$, то в условиях работы при его нагреве от $t_{\text{зап}}$ до $t_{\text{макс}}$ расширение жидкой массы может привести к разрушению корпуса и нарушению герметичности. Если же конденсатор будет запаян при $t_{\text{зап}} \geq t_{\text{макс}}$, то усилится опасность того, что при охлаждении конденсатора (особенно до нижнего предела его рабочей температуры $t_{\text{мин}}$) за счет сокращения объема массы давление внутри корпуса снизится ниже атмосферного. При этом может ухудшиться значение $E_{\text{ион}}$ и возникнуть явление ионизации при рабочем напряжении; кроме того, при сильной усадке массы может обнажиться хвостовик проходного изолятора, рассчитанный на работу в жидком диэлектрике, что может привести к внутреннему перекрытию под крышкой конденсатора. Отчасти колебания объема жидкости внутри конденсатора могут компенсироваться деформацией стенок металлического корпуса, особенно если колебания температуры конденсатора не слишком велики; при использовании недеформирующегося корпуса (например из керамики) и больших колебаниях температуры в конструкции надо предусматривать специальный компенсатор изменений объема жидкости (с и л ь - ф о н).

Не доли в конденсатора, т. е. оставление воздушной подушки под крышкой конденсатора, ослабляет влияние колебаний объема жидкости, но нежелателен, так как воздух, растворяясь в жидкости, может ухудшить ее электрическую прочность, сводя на нет результаты предварительного обезгаживания. При нарушении вертикального положения конденсатора воздух может попасть внутрь секций и вызвать ионизацию; наконец, при наличии воздуха будет идти процесс окисления пропиточной массы, особенно при повышенных рабочих температурах.

При пропитке конденсаторов твердыми воскообразными массами желательно выдерживать конденсаторы в массе до температуры, близкой к точке ее застывания, чтобы ослабить влияние усадки массы. Охлаждение конденсаторов обычно ведут в отдельном баке, куда переносят конденсаторы (или трубки с зажатými в них секциями, при пропитке до сборки в корпусе) из сушильно-пропиточного бака. Иногда такое охлаждение ведут в массе с меньшей точкой плавления или даже в жидком диэлектрике. При пропитке полимеризующейся массой, как уже отме-

¹ Многие фирмы при пропитке больших силовых конденсаторов применяют индивидуальную заливку, при которой пропиточная масса по трубке поступает прямо в пропиточное отверстие конденсатора.

чалось выше, пропитанные конденсаторы (или секции) переносятся в термостат для их «запекания» при повышенной температуре для полимеризации массы.

После запайки отверстий в герметизированных конденсаторах проводится их обмывка подходящим растворителем и проверка на герметичность. Конденсаторы, оказавшиеся герметичными, поступают на окраску корпуса антикоррозионным лаком, проходят просушку и направляются на окончательное испытание и маркировку. Для окраски начали применять электростатический метод, при котором электрическое поле заставляет двигаться заряженные частицы краски, распыленной пульверизатором, по направлению к окрашиваемой поверхности конденсаторов; этот метод уменьшает расход краски и дает более плотное покрытие с лучшей устойчивостью против коррозии. Для ускорения сушки после окраски часто применяют инфракрасное облучение.

§ 79. Силовые бумажные конденсаторы

Название «с и л о в ы е к о н д е н с а т о р ы» (power capacitors, Leistungskondensatoren), или «сильноточные конденсаторы» (Starkstromkondensatoren) обычно относят к конденсаторам, предназначенным для улучшения коэффициента мощности или регулирования напряжения при технической частоте (50 *гц* в СССР и других странах Европы и 60 *гц* в США). В этом параграфе мы расширим содержание этого понятия и рассмотрим все те типы конденсаторов, которые применяются в электроэнергетике и изготавливаются конденсаторными заводами, входящими в систему МЭТП СССР, в отличие от бумажных радиоконденсаторов, изготавливаемых заводами радиодеталей в системе электронной промышленности.

При таком расширении понятия «силовые конденсаторы» оно охватывает не только различные типы бумажных конденсаторов, применяемых при напряжении технической частоты как низком, так и высоком, но и при напряжении постоянного тока и некоторых видах импульсных напряжений, а также при средних частотах (1—10 *кгц*) в устройствах электротермии.

Основным типом бумажного силового конденсатора является конденсатор для улучшения коэффициента мощности промышленных установок при частоте 50 *гц*, называемый также ш у н т о в ы м или к о с и н у с н ы м. После долгих поисков в различных направлениях и промышленного опробования ряда вариантов конструкций (§ 35) мировая практика современного конденсаторостроения при изготовлении подобных конденсаторов пришла к единому конструктивному решению (рис. 230). Конденсатор собирается в герметизированном стальном корпусе 1 с впаянными в крышку фарфоровыми изоляторами 2; основой является пакет плоскопрессованных секций 3,

пропитанных жидким диэлектриком после сборки в корпусе; пакет изолирован от корпуса изоляцией из картона или кабельной бумаги 4, стянутой бандажом 5 (иногда пакет втугую запрессовывается в корпус без применения бандажей и стяжек);

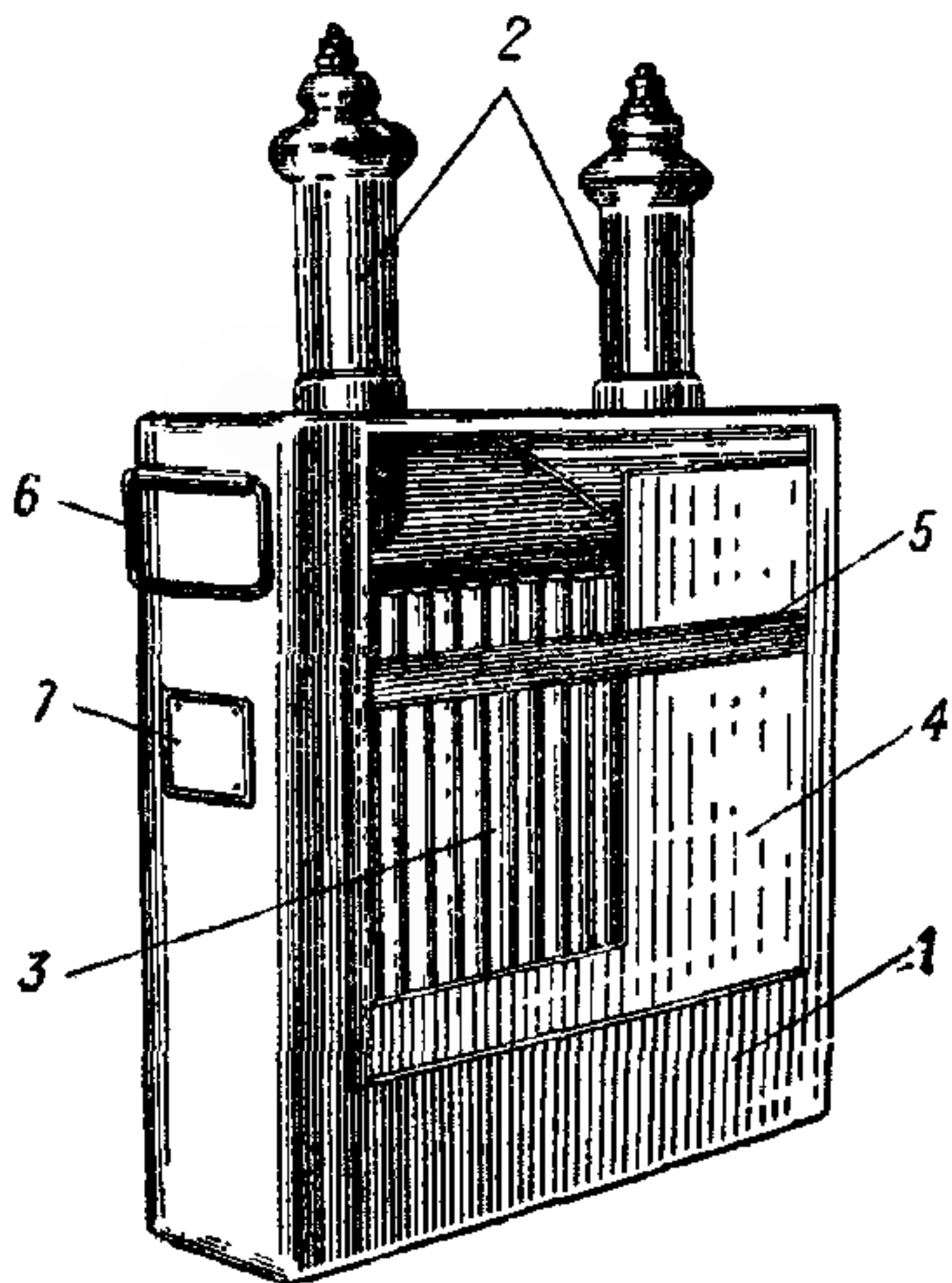


Рис. 230. Силовой конденсатор для улучшения коэффициента мощности при частоте 50 гц.

1 — корпус; 2 — изоляторы; 3 — пакет секций; 4 — изоляция от корпуса; 5 — бандаж; 6 — ручка для транспортировки; 7 — маркировочная табличка.

для удобства транспортировки конденсатор обычно имеет откидные ручки 6; номинальные данные указываются на пластине 7, прикрепленной к стенке корпуса. Максимальная реактивная мощность конденсатора обычно не превышает 50—100 квар. Исключение представляют лишь некоторые типы японских конденсаторов, у которых реактивная мощность достигает до нескольких сотен квар, однако в этих конденсаторах использовано сниженное значение $E_{раб}$ и их удельный объем увеличен.

В СССР конденсаторы этого типа выпускаются с напряжением от 220 в до 10,5 кв с различными нестандартизованными значениями реактивной мощности и с несколькими типовыми размерами корпуса. Два завода, выпускающих эти конденсаторы, имеют различные варианты их выполнения, с различными размерами. В ГОСТ 1282—58 не была предусмотрена

шкала мощностей и габаритных размеров, что затрудняло стандартизацию этого типа конденсаторов и унификацию продукции обоих заводов. В первой редакции нового проекта ГОСТ предусмотрена следующая шкала напряжений и мощностей:

Номинальное напряжение в	Номинальная мощность, квар			
	КМ	КС	КМ2	КС2
220	4,5	6	9	12
380	13	18 и 25*	26	36 и 50*
500	15	20	30	40
660	17	25	34	50
1050; 3150/3				
3150; 6300/3				
6300; 10 500/3	17	25 и 37,5*	34	50 и 75*
10 500				

Первый габарит (КМ и КС) имеет размеры: 380 × 120 × 325 мм, а второй (с увеличенной высотой, КМ2 и КС2): 380 × 120 × 640 мм.

Обозначение КМ и КМ2 соответствует пропитке маслом, а КС и КС2 — пропитке синтетическим жидким хлорированным диэлектриком. Звездочкой обозначены перспективные значения мощности, которые можно будет получить при внедрении новых типов хлорированных масс (ТХД вместо ПХД) и новых сортов бумаги с пониженными потерями. Наибольшее значение реактивной мощности, составляющее для КС 1,7 квар/л и для КС2 1,72 квар/л, при перспективных значениях мощности будет повышено до 2,54—2,58 квар/л. Наилучшие значения удельной мощности у современных зарубежных конденсаторов, изготовленных из новых сортов бумаги и пропитанных новыми модификациями хлордифенила, составляют 2,5—3,5 квар/л и 1,5—2 квар/кг.

По проекту ГОСТ допускаемое отклонение мощности (емкости) от номинала составляет $\pm 10\%$ при $U_{\text{ном}} \leq 1050$ в и $-5 \div +10\%$ при $U_{\text{ном}} > 1050$ в.

При пропитке маслом обычные значения $E_{\text{раб}}$ при частоте 50 гц и напряжениях порядка 600 в и выше составляли 12—13 кв/мм; при меньших напряжениях $E_{\text{раб}}$ снижалось, так как уменьшалась толщина диэлектрика и число слоев бумаги сильно отклонялось от оптимального значения, что снижало величину $E_{\text{пр}}$ и надежность (см. рис. 85). По проекту ГОСТ предусмотрено значение $E_{\text{раб}} = 15$ кв/мм при напряжениях от 660 в и выше с учетом применения масла повышенной газостойкости. В конденсаторах КС и КС2 сохранено тоже значение $E_{\text{раб}}$, и повышение мощности при неизменных размерах конденсатора получено только за счет повышения диэлектрической проницаемости бумаги при переходе от неполярного масла к полярному хлордифенилу.

В перспективе предполагается повысить $E_{\text{раб}}$, когда улучшение угла потерь бумаги позволит получить тепловую устойчивость при повышенной напряженности поля. В зарубежной практике при пропитке хлордифенилами с небольшой вязкостью типа ТХД и использовании бумаги с пониженными потерями применяют $E_{\text{раб}} = 17 \div 18$ кв/мм. Некоторые фирмы в США доходят даже до 20 кв/мм, но при этом можно ожидать некоторого снижения надежности работы.

Конденсаторы должны допускать длительную работу при эффективном значении тока до 130% номинального как за счет повышения напряжения, так и за счет высших гармонических, или за счет того и другого. Испытательное напряжение, прикладываемое в течение 1 мин, составляет 2,15 номинального при частоте 50 гц или 4,3 номинального при испытании на постоянном токе. Эффективное испытательное напряжение по отношению к корпусу составляет от 2,5 до 35 кв в зависимости от $U_{\text{ном}}$. Конденсаторы с напряжением 1050 в и ниже изготавливаются с параллельным соединением секций, причем последовательно с каждой секцией включается плавкий предохранитель.

Зарубежные фирмы обычно выпускают силовые конденсаторы с встроенными внутрь корпуса разрядными сопротивлениями.

Проект ГОСТ предусматривает такую возможность и для наших конденсаторов, причем для конденсаторов на 660 в и ниже напряжение должно снижаться до 50 в за 1 мин, а для конденсаторов с большими $U_{\text{ном}}$ — за 5 мин.

Величина $\text{tg } \delta$ конденсаторов при 50 гц и $+25^\circ \text{C}$ или при $+70^\circ \text{C}$ при пропитке маслом и $+90^\circ \text{C}$ при пропитке хлордифенилом не должна превышать следующих значений ($\times 10^4$):

Номинальное напряжение, в	КМ	КМ2	КС	КС2
220, 380, 500	35	40	40	45
660, 1050	30	30	35	35
Выше 1050	25	25	35	28

Повышенные значения $\text{tg } \delta$ в конденсаторах низкого напряжения вызваны влиянием сопротивления предохранителей, а также сниженным значением $E_{\text{раб}}$ (см. рис. 62). Характер зависимости $\text{tg } \delta$ силовых конденсаторов от температуры (пропитка хлордифенилом) показан на рис. 205, б для высоковольтных конденсаторов. Улучшение качества бумаги позволяет значительно снизить потери и ослабить их рост с температурой.

Увеличение мощности конденсаторных батарей и желание упростить их монтаж и облегчить эксплуатацию привело к необходимости увеличивать единичную мощность силовых конденсаторов. За истекшие годы она поднялась от 10—12 квар до 50—100 квар. Дальнейшее увеличение мощности в единице даже при использовании бумаг повышенного качества, новых типов пропиточных масс и тщательной вакуумной обработки наталкивается на трудности теплового характера [формула (108)]. В связи с этим за рубежом начали применять сборку блоков из 10—12 конденсаторов по 100 квар в специальных обоймах с необходимым зазором между единичными конденсаторами. Из таких готовых блоков уже легче монтировать батареи с большой реактивной мощностью.

Новостью современного силового конденсаторостроения является применение комбинированного диэлектрика из бумаги и неполярной синтетической пленки, позволяющего значительно снизить потери силового конденсатора, по сравнению с чисто бумажным диэлектриком, пропитанным хлордифенилом (§ 86). Это дало возможность повысить единичную мощность американских конденсаторов «Слимвар» (с комбинированным диэлектриком «Магнавар») до 400 квар при значении удельной мощности 5,85 квар/л; в аналогичной конструкции силового конденсатора, разработанного в Италии фирмой «Икар», получены соответственно значения 150 квар и 3,5—4 квар/л.

Для продольной емкостной компенсации длинных линий электропередачи (см. рис. 26) в СССР были разработаны бумажно-

масляные конденсаторы типа КПМ мощностью 50 *квар* и напряжением 600 *в*; путем последовательно-параллельного соединения из них была собрана уникальная батарея продольной компенсации общей мощностью 500 000 *квар* на линии передачи Куйбышев — Москва. По конструкции они были подобны обычным силовым конденсаторам, но $E_{\text{раб}}$ было в них несколько снижено для повышения надежности. Опыт эксплуатации этой батареи подтвердил правильность выбора конструкции конденсаторов.

Для улучшения коэффициента мощности индукционных электротермических установок с машинными генераторами требуются силовые конденсаторы, рассчитанные на работу при средних частотах порядка 1—10 *кГц*.

Повышение частоты вызывает пропорциональное увеличение потерь в конденсаторе при $\text{tg } \delta = \text{const}$; кроме того, в этой области частот уже наблюдается начало заметного возрастания $\text{tg } \delta$ бумажного конденсатора (рис. 231). Поэтому использование пропитанной бумаги в качестве диэлектрика в таких конденсаторах потребовало применения водяного

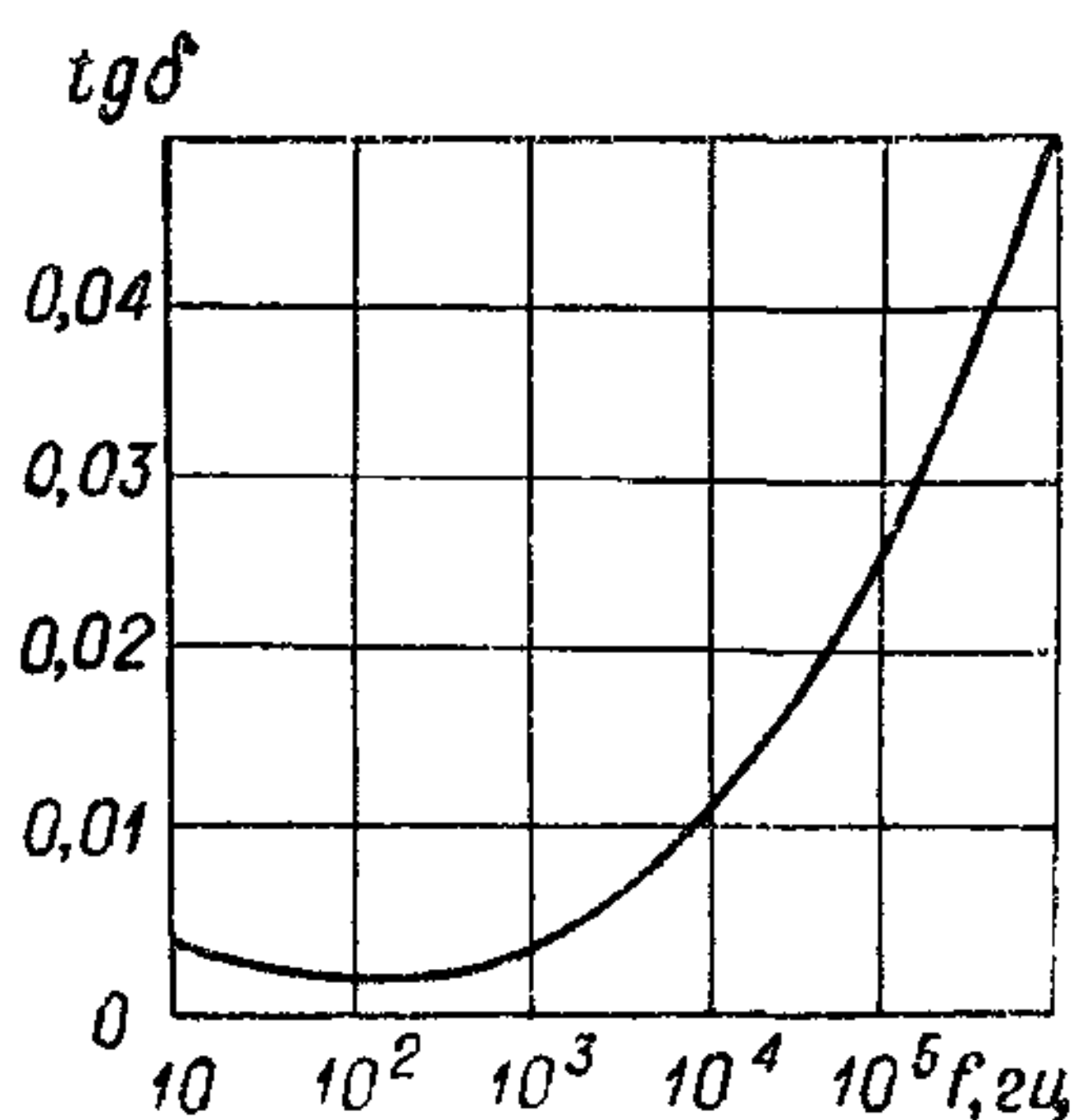


Рис. 231. Зависимость угла потерь бумажно-масляного конденсатора от частоты.

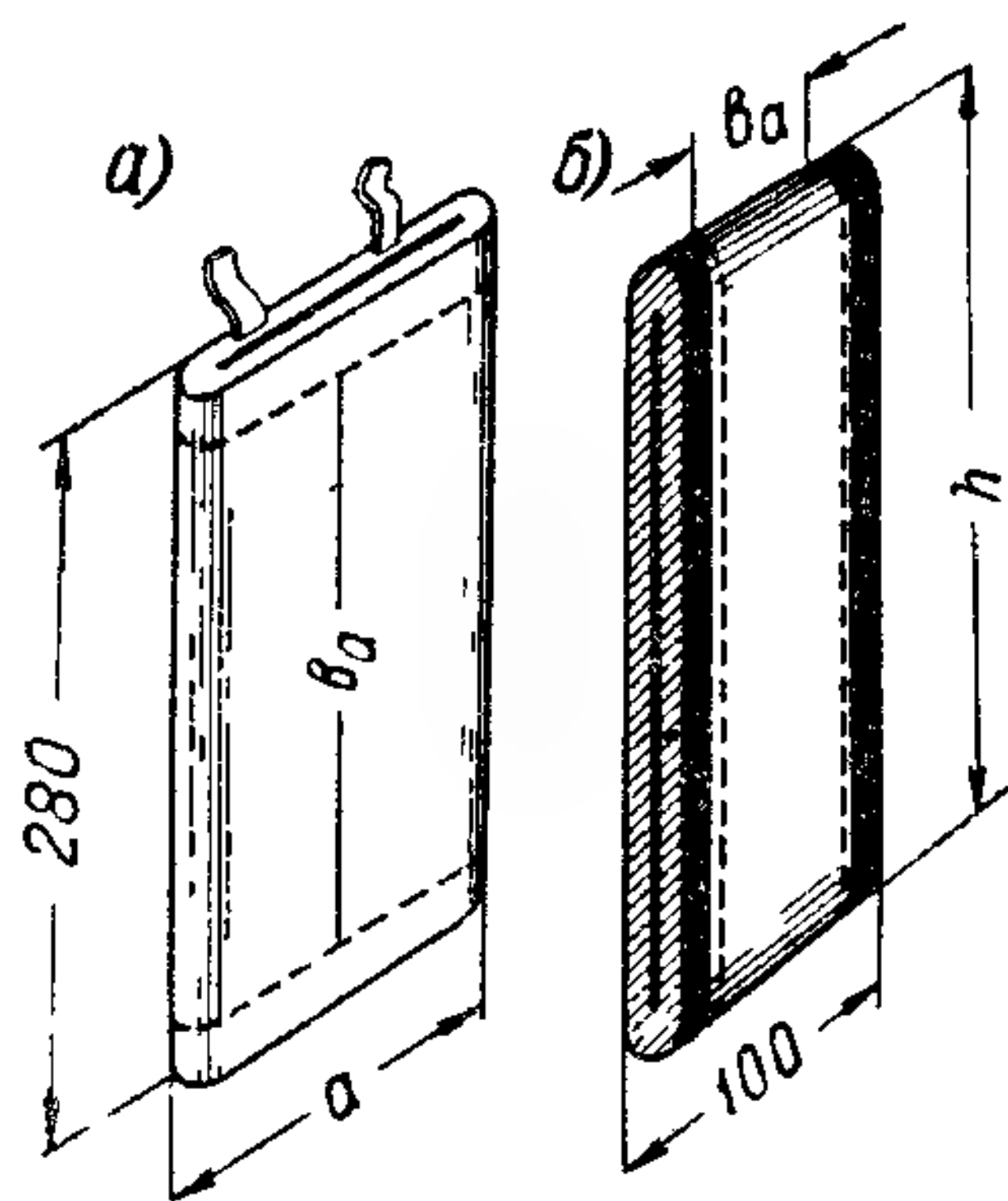


Рис. 232. Форма секций силовых конденсаторов: а — для работы при частоте 50 *Гц*; б — для работы при повышенной частоте.

охлаждения для отвода тепла, выделяющегося в конденсаторе (см. рис. 135, б). Для улучшения внутренней теплопроводности конденсаторных секций и уменьшения потерь в обкладках их устройство было изменено по сравнению с секциями для конденсаторов нормальной частоты (рис. 232), резко увеличен диаметр намоточной оправки и применена намотка с выступающей фольгой, толщина фольги увеличена до 16 *мкм*; одна из обкладок непосредственно прижимается к охлаждающему змеевику. При верхнем пределе рабочей частоты (8000 *Гц*) корпуса конденсаторов изготавливаются не из стали, а из латуни.

В СССР выпускаются конденсаторы этого типа, пропитанные маслом (ЭМВ и ЭМВП) и соволом (ЭМС и ЭСВП). В конденсаторах ЭМВ и ЭСВ секции разбиты на две или четыре группы равной емкости, что позволяет использовать их при двух значениях $U_{\text{ном}}$; в конденсаторах ЭМВП и ЭСВП емкости в группах секций различны. Конденсаторы выпускаются в нескольких вариантах

с напряжениями от 375 до 1000 в (при последовательном соединении групп — до 2000 в), для частот 1000, 2500 и 8000 гц с номинальной мощностью от 80 до 200 квар при пропитке маслом и 140—300 квар при пропитке соволом. Значения удельной мощности: при пропитке маслом 5,3—13,4 квар/л, а при пропитке соволом 9,6—20,1 квар/л (соответственно на единицу веса: 3—7,7 квар/кг и 4,7—10 квар/кг). Некоторые зарубежные фирмы выпускают конденсаторы этого типа с неполярным пленочным диэлектриком без водяного охлаждения (§ 84).

Рассмотренные здесь типы силовых конденсаторов имели $U_{\text{ном}}$ до 10,5 кв. При дальнейшем увеличении номинального напряжения начинают сильно возрастать размеры выводных изоляторов;

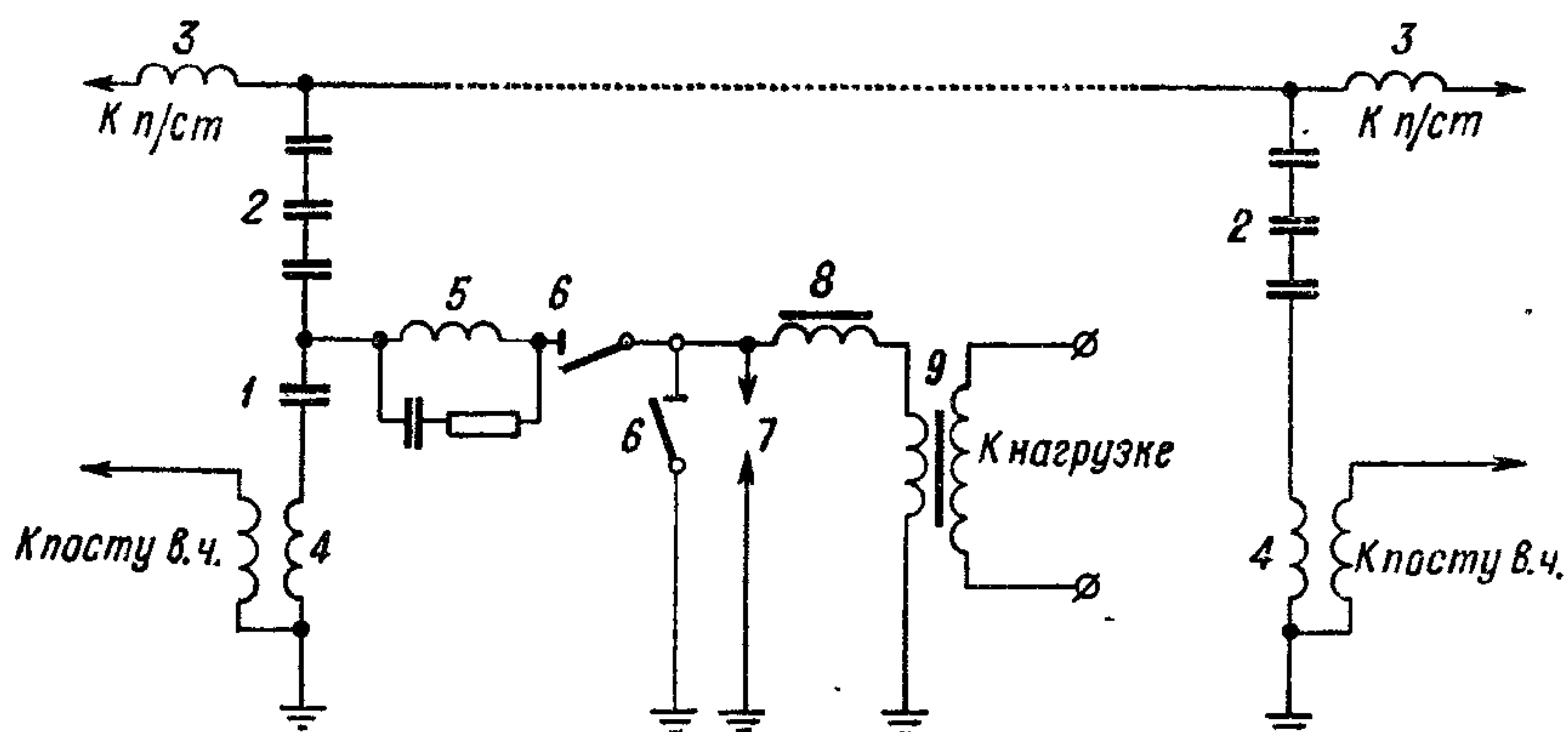


Рис. 233. Схема устройства связи и конденсаторного отбора мощности от линии электропередачи 500 кв.

1 — конденсатор отбора мощности; 2 — конденсаторы связи; 3 и 5 — высокочастотные заградители; 4 — высокочастотный трансформатор; 6 — разъединитель; 7 — разрядник; 8 — реактор; 9 — трансформатор отбора мощности.

поэтому при высоких напряжениях и относительно небольших емкостях оказывается целесообразным собирать конденсаторы в изоляционных корпусах, т. е., иными словами, размещать секции конденсатора в изоляторе, используя его внутренний объем. При работе на открытом воздухе используются фарфоровые корпуса, а при работе в закрытых помещениях — гетинаксовые цилиндры (намотанные из бумаги, пропитанной бакелитовым лаком).

Для непосредственного подключения к линиям электропередачи высокого напряжения применяются конденсаторы связи типа СМР, служащие для включения высокочастотной аппаратуры в линию передачи. Это позволяет использовать линию для осуществления надежной связи на частоте 40—300 кгц. Конденсаторы отделяют аппаратуру связи от высокого напряжения, пропуская токи высокой частоты по каналам связи (рис. 233). Конденсаторы типа СМР собираются из большого числа последовательно соединяемых секций, помещаемых в фарфоровом кор-

пусе с металлическими дном и крышкой, механически закрепленными на фарфоре; уплотнение осуществляется прокладками из масло- и морозостойкой резины. Компенсация изменения давления масла при колебаниях температуры окружающей среды осуществляется помещением внутрь конденсатора набора мембранных коробок. Они изготавливаются из двух тарельчатых мембран, герметично сваренных между собой. Внешний вид такого конденсатора показан на рис. 234. Номинальные данные конденсаторов типа СМР: напряжение от $55/\sqrt{3}$ до $166/\sqrt{3}$ кВ (32—96 кВ), емкость 0,0044—0,014 мкф; диаметр 448—730 мм, высота 780—1370 мм, вес 175—950 кг.

При необходимости получить конденсатор связи на напряжение линии выше 110 кВ два или более конденсаторов включают последовательно, ставя их один на другой в виде колонны. Хотя эти конденсаторы рассчитаны на основную нагрузку высоким напряжением при частоте 50 гц, следует иметь в виду, что они должны пропускать также ток высокой частоты, используемый в каналах связи. С этой точки зрения, зависимость емкости конденсатора от температуры, особенно в области низких температур, следует определять в области частот до 200—300 кГц. Обычные полярные хлорированные массы при такой частоте резко снижают ϵ (а следовательно, и емкость конденсаторов) при температурах ниже $-10 \div -15^\circ\text{C}$ (ПХД — уже при $+20^\circ\text{C}$, рис. 216); поэтому для пропитки конденсаторов связи применяли лишь непolarное нефтяное масло; появление новых морозостойких хлорированных масс (например, 4 на рис. 216) позволяет применить их и в конденсаторах связи.

Добавляя к конденсаторам связи дополнительный конденсатор с увеличенной емкостью, можно получить устройство для отбора мощности от линии высокого напряжения с помощью небольшого трансформатора, рассчитанного на меньшее напряжение (см. рис. 254). В этом случае применяют конденсаторы типа ОМР на 15 кВ и 0,1 мкф, конструкция которых подобна конденсаторам СМР. Вес конденсатора 450 кг, размеры $\Phi 730 \times 780$ мм. Аналогичной конструкцией обладают также конденсаторы типов ДМН и ДМР, рассчитанные на напряжения 40—80 кВ и емкости 0,0001—0,0044 мкф и предназначенные для

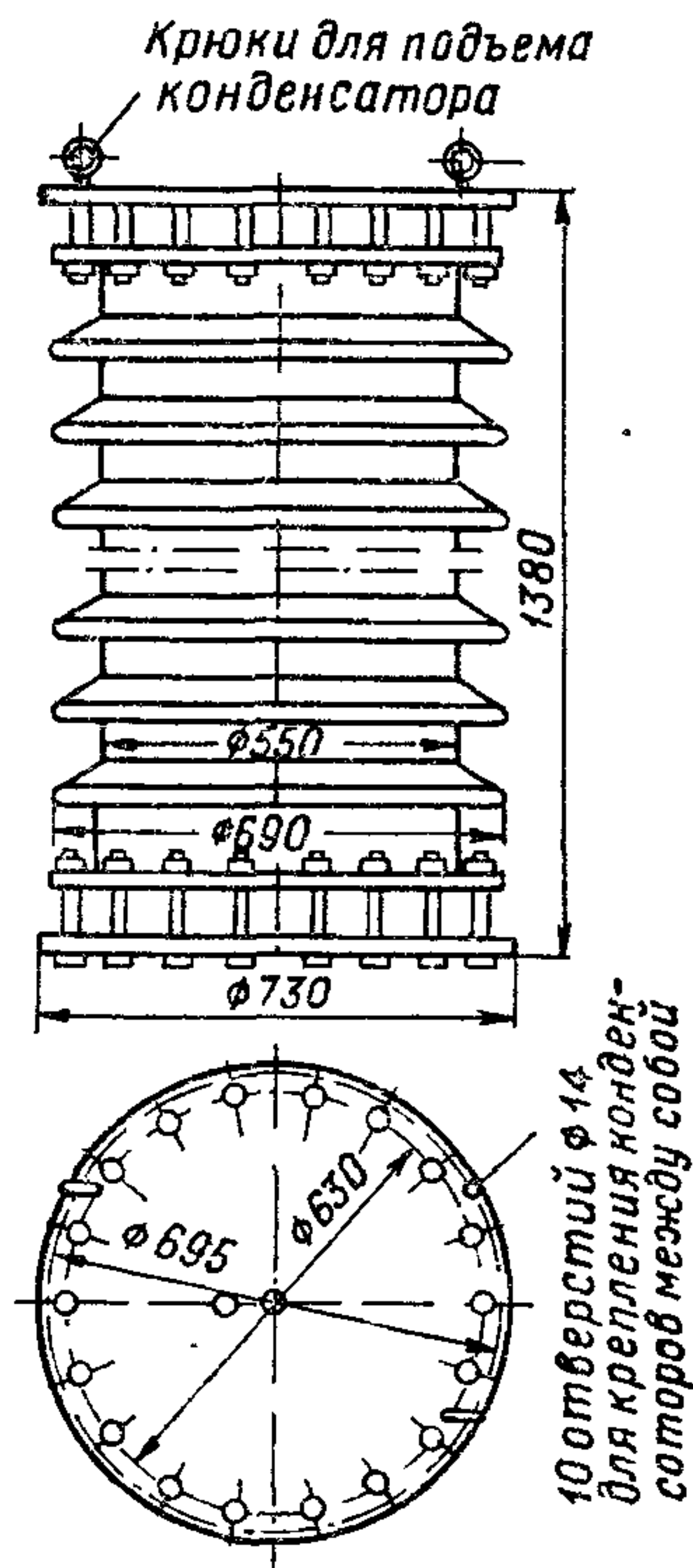


Рис. 234. Конденсатор связи типа СМР $166/\sqrt{3} - 0,014$.

применения в схемах емкостных делителей напряжения.

Строительство первой мощной линии передачи энергии постоянным током при напряжении ± 400 кВ (Волгоград — Донбасс) потребовало разработки специальных высоковольтных конденсаторов постоянного напряжения для их использования в демпфирующих и выравнивающих контурах преобразовательных подстанций с целью сглаживания кривой выпрямленного напряжения, отфильтровывания высших гармоник и демпфирования переходных процессов. Для этих целей нужны конденсаторы, рассчитанные на напряжения постоянного тока от 9 до 140 кВ и выдерживающие воздействия различных

значений переменного напряжения до 50 кВ, номинальные емкости — от 0,005 до 6,35 мкФ (при $U_{\text{ном}} = 11$ кВ пост. тока). При напряжении 50 кВ и выше эти конденсаторы изготовляют в фарфоровых корпусах (тип ВМФ), подобно конденсаторам связи, при меньших напряжениях — в стальных корпусах (тип ВМ), подобно обычным косинусным конденсаторам.

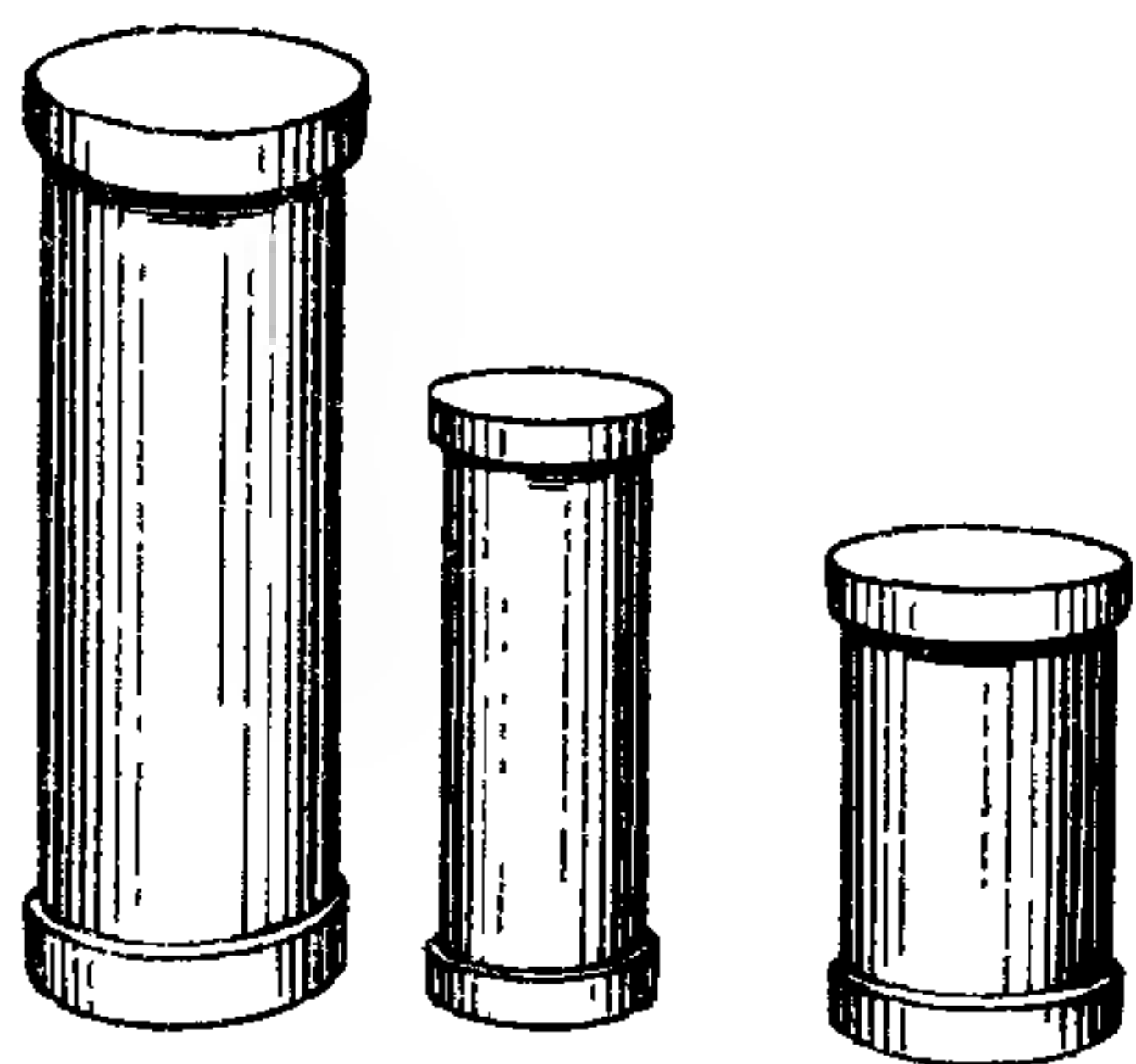


Рис. 235. Импульсные конденсаторы в бакелитовых корпусах

Конденсаторы постоянного напряжения применяют также на тяговых подстанциях в фильтрах, сглаживающих пульсации выпрямленного напряжения. Фильтровые конденсаторы типа ФМТ подобны косинусным конденсаторам по конструкции: номинальное напряжение 4 кВ пост. тока, емкость 2×5 мкФ; они должны выдерживать наложение переменной составляющей тока с частотой 300—1440 Гц (до 1—2 А на 1 мкФ).

Импульсные конденсаторы типа ИМ, рассчитанные на работу в режиме заряд — разряд и предназначенные для применения в закрытых помещениях (например, для изготовления лабораторных генераторов импульсов), ранее изготовлялись только цилиндрического типа в изоляционных корпусах — гетинаксовых цилиндрах (рис. 235) с относительно небольшой емкостью: 0,01—0,03 мкФ при напряжении 40—110 кВ; благодаря плохому использованию внутреннего объема (стопка последовательно соединенных плоских прямоугольных секций в корпусе круглого сечения), удельная энергия была невелика: до 6—7,5 Дж/л и 3,5—5 Дж/кГ. При изготовлении мощных конденсаторов этого же типа с общим запасом энергии до 9000—18 000 Дж (150—300 кВ и 0,8—0,4 мкФ) и применении последовательно-параллельного соединения секций удалось довести удельные характеристики до 13,0—13,3 Дж/л и 8—9 Дж/кГ. Переход к прямоугольным корпу-

сам из винипласта позволил получить 20—22 дж/л и 14—16 дж/кГ при энергии 250—550 дж. При меньших напряжениях и использовании стальных корпусов (2—30 кВ) при запасах энергии порядка 500—3500 дж были получены удельные значения 20—50 дж/л и 12—28 дж/кГ. Все эти данные относятся к бумажномасляным конденсаторам. Применение пропитки нитросоволом позволило изготовить конденсатор типа ИНС6-200 на 3600 дж, для которого были получены рекордные значения: 143 дж/л и 36,5 дж/кГ¹. Импульсные конденсаторы применяются не только в схемах генераторов импульсов напряжения (ГИН), но и в схемах генераторов импульсов тока (ГИТ), в установках для исследования управляемых ядерных реакций (с большим запасом энергии в единице) и т. д. Во многих случаях применения от импульсного конденсатора требуется малая индуктивность (§ 17). Высоковольтные конденсаторы, аналогичные по конструкции импульсным типа ИМ, применяют также в фильтрах выпрямителей в промышленных и медицинских рентгеновских установках и для других целей.

К числу силовых конденсаторов можно отнести также небольшие бумажные конденсаторы, применяемые в силовой электротехнике для различных целей, например, в схемах конденсаторных двигателей, в установках люминисцентного освещения, в стабилизаторах напряжения и т. д. За рубежом для всех этих целей применяются специализированные типы конденсаторов. В наших условиях только для стабилизаторов был разработан конденсатор типа СМ, специально рассчитанный на работу при переменном напряжении технической частоты (650 В, 50 Гц; 5 мкФ; 79×94××115 мм). В настоящее время спроектирована специальная серия конденсаторов переменного напряжения для схем люминисцентного освещения на напряжения 150, 250 и 400 В, 50 Гц; номинальные емкости 1—9 мкФ. Эти конденсаторы будут изготавливаться в массовом производстве с пропиткой соволом. Для пуска конденсаторных электродвигателей малой мощности применяют электролитические конденсаторы (§ 88), но для длительного включения в одну из обмоток двигателя (см. рис. 27, конденсатор С₁) требуются специальные бумажные конденсаторы.

Величина допускаемой рабочей напряженности электрического поля в диэлектрике силового конденсатора при напряжении с частотой 50 Гц уже указывалась выше. Поскольку величина $E_{\text{раб}}$ определяет собой вес и размеры конденсатора и его удельные характеристики, полезно указать ее значения и при других режимах работы, принятые в силовом конденсаторостроении. Сравнение этих значений с величиной $E_{\text{раб}}$ при частоте 50 Гц дано ниже применительно к пропитке маслом (по А. И. Гулевичу и А. П. Кирееву):

¹ Применяя пропитанные фосфатным эфиром конденсаторы из пленки ПЭТФ (§ 84) при кратковременной работе получают до 300—600 дж/л (IEE Trans. on El. Ins., 1967, vol E 1—3, № 2).

Длительный при частоте 50 гц	12—14
То же при частоте 0,5—10 кгц и естественном воздушном охлаждении	4—7
То же при частоте 0,5—10 кгц и форсированном водяном охлаждении	5—11
При подключении к линии передачи высокого напряжения (конденсаторы связи) при частоте 50 гц . . .	7—9
Длительный при постоянном напряжении	30—50
Кратковременный при циклических зарядах и разрядах	40—75
То же при ограниченном сроке службы	75—100

При пропитке хлорированными дифенилами, как уже отмечалось, при переменном напряжении с частотой 50 гц величину $E_{\text{раб}}$ можно поднять до 16—18 кВ/мм, при других режимах изменение $E_{\text{раб}}$ при замене пропитки маслом на пропитку хлордифенилом еще нуждается в уточнении; при пропитке касторовым маслом, при постоянном напряжении и некоторых импульсных режимах $E_{\text{раб}}$ может быть повышено по сравнению с пропиткой нефтяным маслом. Подробные данные о деталях технологии и конструкции силовых конденсаторов можно найти в книге А. И. Гулевича и А. П. Киреева (1965 г.), а дополнительные сведения о характеристиках отечественных и зарубежных конденсаторов этого типа — в брошюрах Д. С. Варшавского.

§ 80. Бумажные конденсаторы для электронной техники

Для упрощения мы будем называть конденсаторы этого типа бумажными радио конденсаторами, тем более, что значительное их количество еще применяется в радиоаппаратуре. Если в области производства силовых конденсаторов для частоты 50 гц бумага еще занимает монопольное положение,¹ то в области радио конденсаторов у нее имеется ряд конкурентов. При небольших емкостях, порядка $0,01 \div 0,1$ мкф и ниже, заменителем бумаги является низкочастотная керамика, позволяющая упростить конструкцию конденсатора, снизить его размеры и стоимость, хотя и за счет некоторого ухудшения электрических свойств. В области больших емкостей и низких напряжений бумажные конденсаторы в ряде случаев заменяются электролитическими новых типов, например оксидно-полупроводниковыми. При повышенной частоте, а также при высоких температурах на смену бумаге приходит синтетическая пленка. Тем не менее, до сих пор и в электронной технике бумага занимает еще важное

¹ Только в 1966 г. появились первые образцы пленочнобумажных силовых конденсаторов в США и в 1967 г. — в Италии. В. Т. Ренне. «Электричество» №5, 1968).

место среди конденсаторных диэлектриков и в наших условиях потребность в ней не сокращается, а продолжает возрастать. В этой области техники бумажный конденсатор преимущественно применяется в цепях постоянного тока, а потому в маркировке указывают постоянное номинальное напряжение; в последнее время бумажные конденсаторы начали широко применять и в импульсных режимах, обычно при ограниченной частоте следования импульсов; при небольших напряжениях, когда мощность потерь невелика, возможно применение бумажных конденсаторов

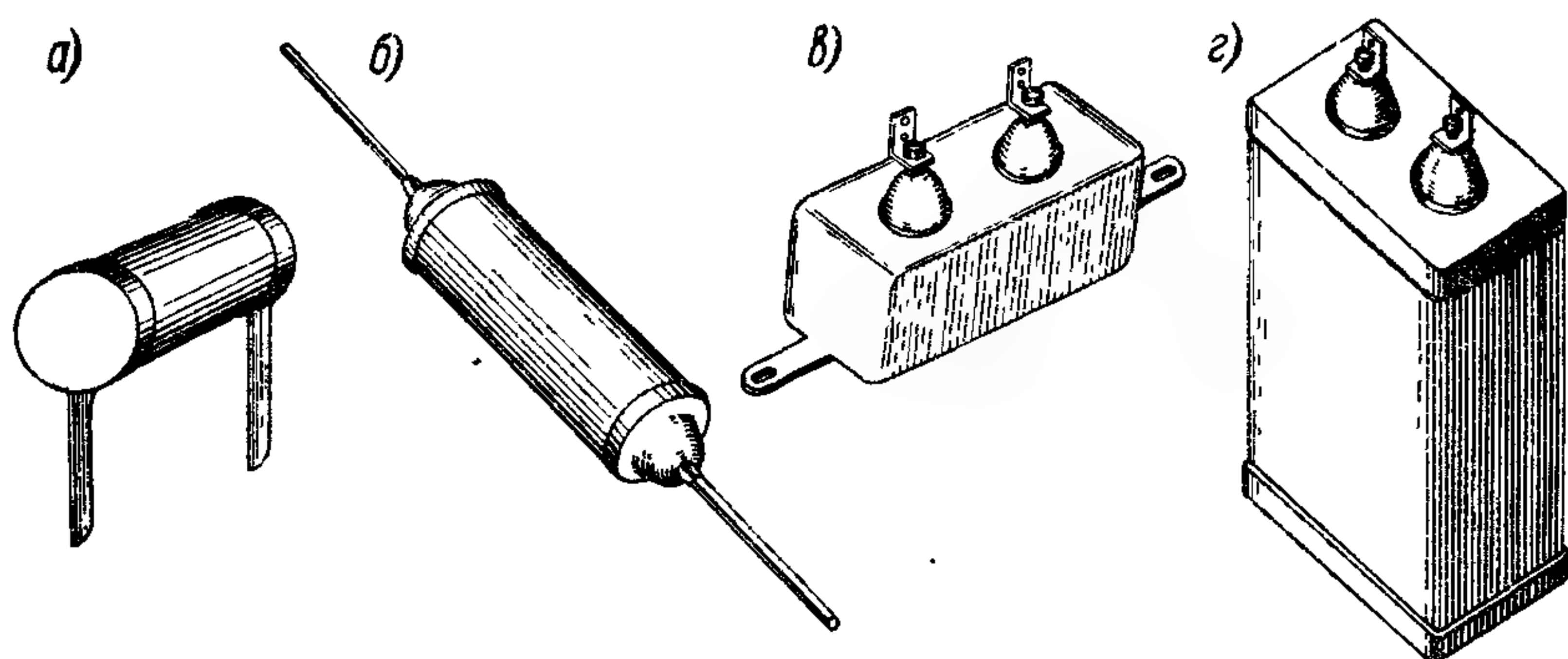


Рис. 236. Бумажные герметизированные конденсаторы типа КБГ:
 а — КБГ-И; б — КБГ-М; в — КБГ-МП; г — КБГ-МН.

и при повышенных частотах. Многие типы бумажных радиоконденсаторов используют в устройствах проводной связи, в схемах автоматики и телемеханики и т. д.

Основным типом бумажных радиоконденсаторов является тип КБГ — бумажный герметизированный конденсатор, рассчитанный на работу при высокой влажности и в диапазоне температур от -60 до $+70^{\circ}\text{C}$. Конденсаторы КБГ изготавливаются в нескольких конструктивных модификациях (рис. 236) как в цилиндрических, так и в прямоугольных корпусах; низковольтная серия конденсаторов КБГ выпускается с напряжениями от 200 до 1500 в, высоковольтная — от 2 до 30 кВ. Испытательное напряжение составляет $3U_{\text{ном}}$ при $U_{\text{ном}} \leq 1 \text{ кВ}$, $2U_{\text{ном}}$ при $U_{\text{ном}} = 1,5 \div 15 \text{ кВ}$ и $1,5 U_{\text{ном}}$ при $U_{\text{ном}} > 15 \text{ кВ}$. Допускаемое значение амплитуды переменной составляющей зависит от частоты:

Частота, гц	Амплитуда переменной составляющей в % от номинального напряжения
50	20
100	15
300	10
1 000	5
10 000	2

Для конденсаторов с напряжением 1500 в и ниже допускается работа при переменном напряжении при соблюдении следующих условий:

Номиналь- ное напря- жение, в (пост. ток)	Допускаемое эффективное значение перемен- ного напряжения, в			
	Частота 50 гц		Частота 500 гц	
	$C_{ном}$ до 2 мкф	4—10 мкф	$C_{ном}$ до 2 мкф	4—10 мкф
200	160	130	100	50
400	250	200	125	75
600	300	250	150	100
1000	400	350	200	150
1500	500	—	250	—

Основные электрические характеристики конденсаторов типа КБГ:

Допускаемое отклонение емкости от номи- нала	$\pm 5; \pm 10$ и $\pm 20\%$
Изменение емкости при -60°C (в % от C_{20})	$\pm 10\%$
Изменение емкости при $+70^{\circ}\text{C}$ (в % от C_{20})	$\pm 5\%$
$\text{tg}\delta$ при 20°C в частоте 1 кгц или ниже	не более 0,01
Постоянная времени при 20°C ($C_{ном} \geq$ $\geq 0,25$ мкф)	не ниже 2000 ом·ф
То же, при 70°C	» 75 ом·ф
Сопротивление изоляции (при $C_{ном} <$ $< 0,25$ мкф) при 20°C	» 10 000 Мом
То же, при 70°C	» 500 Мом
Пределы номинальной емкости	от 680 пф до 10 мкф

Для работы при повышенной температуре до $+100^{\circ}\text{C}$ была разработана серия бумажных конденсаторов БГТ с напряжением $U_{ном} \leq 1500$ в. В этих конденсаторах вместо паяных корпусов использованы сварные и применены изоляторы ИКПТ (рис. 123, ж); вместо пропитки вазелином намечена пропитка октолом. Ниже дается сравнение рабочих значений напряженности поля (пост. ток) в конденсаторах КБГ и БГТ при длительной работе (5000 ч). Для серии БГТ была предусмотрена возможность применения при 85°C при повышенных напряжениях в сравнении с номинальным.

Номинальное напряжение, в	Серия КБГ		Серия БГТ			
	d , мм	$E_{раб'}$ кв/мм (70°C)	d , мм	$E_{раб'}$ кв/мм (100°C)	$E_{раб'}$ кв/мм (85°C)	$U_{раб'}$, в (85°C)
200	2×8	12,5	3×8	8,3	12,5	300
400	3×8	16,7	4×8	12,5	18,7	600
600	3×10	20	4×10	15	20	1000
1000	4×10	25	5×10	20	30	1500
1500	5×10	30	6×10	25	33,4	2000

Таким образом, при 85° С и равной толщине диэлектрика в серии БГТ были использованы те же значения $E_{\text{раб}}$, что в серии КБГ при 70° С; при 100° С величина $E_{\text{раб}}$ уже снижена (derating, см. рис. 104). При сокращенном сроке службы (не более 100 ч) допускается применение конденсаторов БГТ при номинальном напряжении и +125° С. Для замены высоковольтной серии КБГ-П разработана серия К-41-1, как и серия БГТ, рассчитанная на работу при +100° С.

В настоящее время дальнейшее улучшение характеристик и надежности бумажных конденсаторов герметизированного типа достигнуто за счет замены бумаги комбинированным пленочно-бумажным диэлектриком (§ 86).

Наряду с герметизированными бумажными конденсаторами изготавлиются также конденсаторы уплотненной конструкции, рассчитанные на работу при комнатной или повышенной влажности (§ 42) и допускающие лишь кратковременное использование при высокой влажности. Кроме устаревших серий КБ (в картонных корпусах, залитых битумом, рис. 119, в) и БПП (в прямоугольном металлическом корпусе открытого типа, рис. 119, а), выпускаются новые серии малогабаритных цилиндрических конденсаторов БМ и БМТ (ГОСТ 9687—61). В качестве корпуса используется алюминиевая трубка, у серии БМ уплотнение производится заливкой эпоксидным компаундом (предел температуры от -60 до +70° С) (рис. 119, г). Для конденсаторов БМ: $U_{\text{ном}} = 150, 200$ и 300 в и $C_{\text{ном}} = 470 \text{ нф} \div 0,047 \text{ мкф}$; для конденсаторов БМТ: $U_{\text{ном}} = 400$ и 600 в и $C_{\text{ном}} = 470 \text{ нф} \div 0,22 \text{ мкф}$. Допускаемые значения амплитуды напряжения переменной составляющей пульсирующего тока U_{\sim} в % от номинального напряжения постоянного тока $U_{\text{ном}}$ составляют:

Частота, гц	U_{\sim} при $C \leq 0,05 \text{ мкф}$	U_{\sim} при $C > 0,05 \text{ мкф}$
50	35	20
100	25	15
500	18	8
1 000	10	5
5 000	5	3
10 000	2	2

При работе конденсаторов в цепях синусоидального переменного тока допускаемые э ф ф е к т и в н ы е значения

напряжения не должны превышать значений: приведенных ниже:

Номиналь- ное напря- жение, в (пост. ток)	Номинальная емкость	Эффективное переменное напряжение, в при частоте		
		50 гц	500 гц	1 кгц
600	До 0,022 мкф	300	175	75
400	До 0,05 мкф	250	150	75
400	0,068—0,25 мкф	200	100	40
300	До 2200 пф	230	120	60
200	От 3300 пф до 0,33 мкф	150	75	40
150	0,033—0,05 мкф	100	60	30

Срок службы при $U_{ном}$ и $t_{макс}$ для БМ — 5000 ч, для БМТ — 1000 ч; если применять БМТ при 70° С вместо 100° С, то срок службы гарантируется до 5000 ч.

Основные электрические характеристики конденсаторов БМ и БМТ:

Допуск по емкости	± 10 и $\pm 20\%$ (для БМТ еще и $\pm 5\%$)
Изменение емкости после 250 ч при 1,2 $U_{ном}$ и $t_{макс}$	$\pm 10\%$
$tg\delta$ при 20° С и влажности не более 80%	не более 0,01
Сопротивление изоляции (для БМ и БМТ соответственно) при температуре 20° С	не менее 5000 и 10 000 $Mом$
То же, при максимальной рабочей температуре	не менее 200 и 100 $Mом$
То же, после пребывания 120 час при влажности 95—93% и температуре +40° С (для БМ и БМТ соответственно)	не менее 2500 и 5000 $Mом$

Для более тяжелых условий работы (высокая влажность, верхний предел температуры до +125° С) разработана новая серия цилиндрических герметизированных конденсаторов К40У-9 в стальных корпусах со стеклопрессованными изоляторами с номинальным напряжением 200—1000 в и номинальной емкостью до 0,22 мкф. Некоторые сводные данные о бумажных радиоконденсаторах низкого напряжения приведены в табл. 21. Аналогичные данные о высоковольтных бумажных конденсаторах даны ниже, в табл. 26.

Специальными типами бумажных конденсаторов являются защитные КЗ и проходные КБП, используемые для подавления радиопомех и пригодные для работы как при постоянном, так и при переменном напряжении при частоте 50 гц. Соотношение

Таблица 21*

Бумажные конденсаторы с постоянным рабочим напряжением
1600 в и ниже

Тип	C _{ном}		U _{ном} , в	Максимальный заряд		t _{макс} , °C	Конструкция
	нф	мкф		мкк	мкк/см ³		
КБ	4700	0,5	200—600	120	6,7	60	Уплотненная
БМ	470	0,05	150—300	7,5	8,1	70	»
БМТ	470	0,25	400—600	100	11,1	100	»
КБГ-И	470	0,10	200—600	20	4,3	70	Герметизированная
КБГ-М	10 · 10 ³	0,25	200—600	100	8,7	70	»
КБГ-МП	10 · 10 ³	2	200—1500	600	9,2	70	»
КБГ-МН	25 · 10 ⁴	10	200—1500	4000	9,3	70	»
БПП	25 · 10 ⁴	2	200	400	8,9	45	Уплотненная
БГТ	10 · 10 ³	10	200—1500	4000	6,7	100	Герметизированная
К40У-9	470	1	200—1000	220	15,2	125	»

* См. примечание к табл. 15.

между номинальными значениями постоянного и эффективного значения переменного напряжения характеризуется следующими данными:

U _{пост} , в	110	250	500	1000	1500
U _{перем} , в	50	127	220	380	500

З а щ и т н ы е к о н д е н с а т о р ы предназначены для установки в борновые коробки электрических машин, в кожухи и каркасы силовых распределительных щитов станций и подстанций и других устройств с целью устранения помех радиоприему. Конденсаторы изготавлиются в герметизированных цилиндрических корпусах: один вывод присоединяется к корпусу (рис. 237); номинальная емкость 0,1—1 мкф. Внутри конденсатора помещается плавкий предохранитель, отключающий конденсатор в случае его пробоя. По конструкции и электрическим характеристикам конденсатор КЗ близок к конденсаторам типа КБГ (норма на tg δ несколько расширена: до 0,015). При частоте 15—25 Мгц гарантируется z не более 6,5 ом. П р о х о д н ы е к о н д е н с а т о р ы (§ 17) (ГОСТ 6760—53) предназначены для подавления промышленных радиопомех при максимальном значении тока через проходной стержень («шинку») до 70 а. При больших значениях тока конденсаторы могут быть изготовлены по специальному заказу. Номинальная емкость от 0,025—0,05 до 1—2 мкф. По электрическим свойствам эти конденсаторы также соответствуют конденсаторам типа КБГ. Конденсаторы типов КЗ и КБП

имеют интервал рабочих температур $-60 \div +70^\circ \text{C}$. Для конденсаторов КБП оговаривается величина полного сопротивления z в диапазоне частот от 0,15 до 150 Мгц, которая не должна превышать величин, указанных на графиках рис. 238.

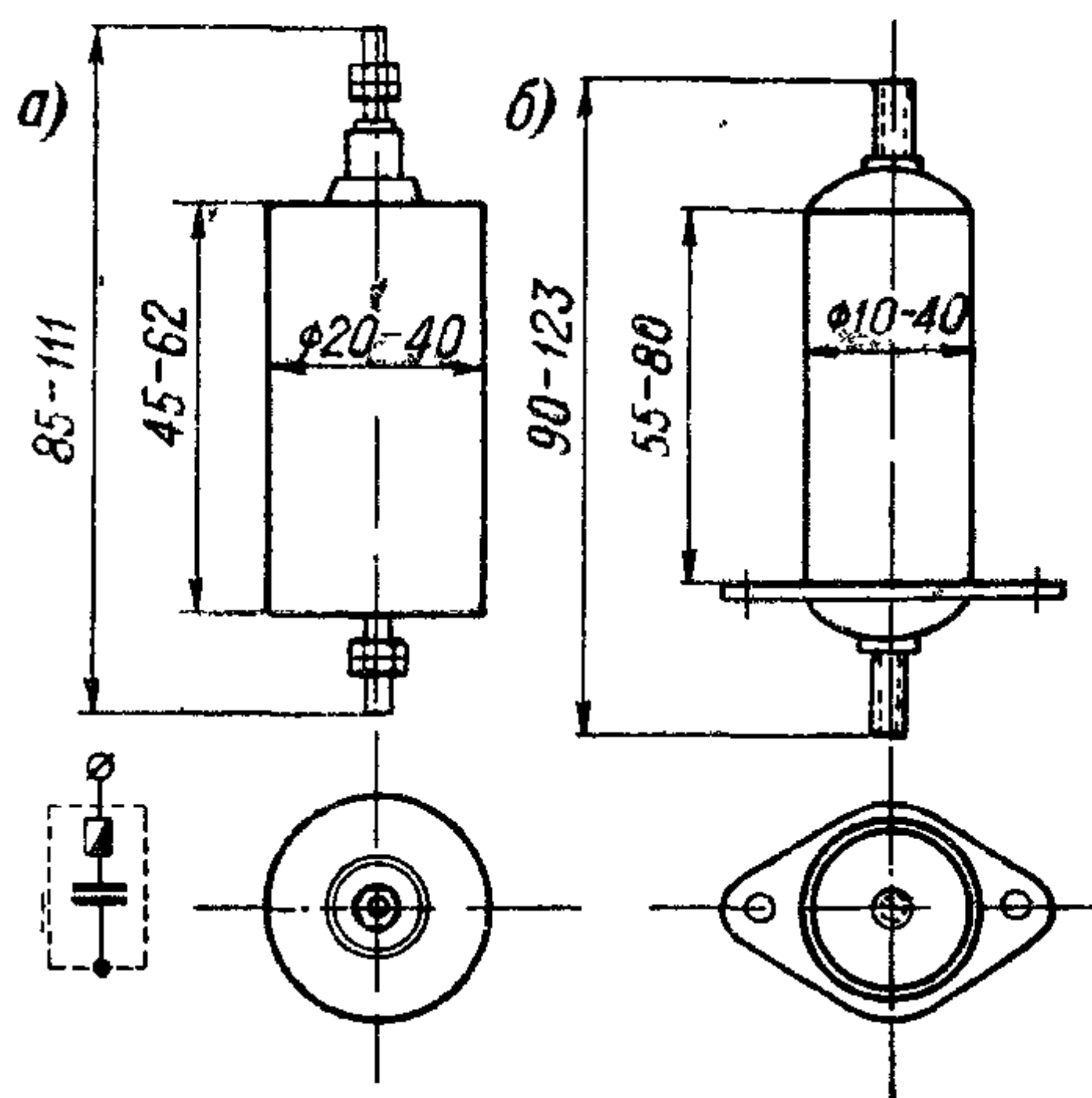


Рис. 237. Защитный (а) и проходной (б) конденсаторы.

Телефонные конденсаторы типа БПП рассчитаны на мягкие условия работы, а потому изготавливаются негерметизированной конструкции (рис. 119, а) и пропитываются парафином (предел рабочих температур $-15 \div +45^\circ \text{C}$). Рабочее напряжение 200 в; $C_{\text{ном}} = 0,25 \div 2 \text{ мкф}$. Постоянная времени — не ниже 200 ом · ф при 20°C и не ниже 20 ом · ф при 45°C ; $\text{tg } \delta$ при 20°C и 1 кгц — не выше 0,015.

Автомобильные конденсаторы используются в схемах электрооборудования автомобилей для шунтирования контактов прерывателя с целью уменьшения их износа и улучшения условий зажигания горючей смеси. К конденсатору прикладывается небольшое постоянное напряжение от батареи: 6—12 в, но при работе прерывателя на выводах конденсатора возникают перенапряжения повышенной частоты (2—3 кгц) с амплитудой до 150—350 в. Обычное испытательное напряжение этих конденсаторов 600 в (эфф.) при частоте 50 гц; емкость 0,17—0,25 или 0,3—0,33 мкф. Конденсаторы изготавливаются заводами автотракторного оборудования. Кроме того, в схемах электрооборудования автомобилей используются также конденсаторы для подавления радиопомех с несколькими значениями емкости.

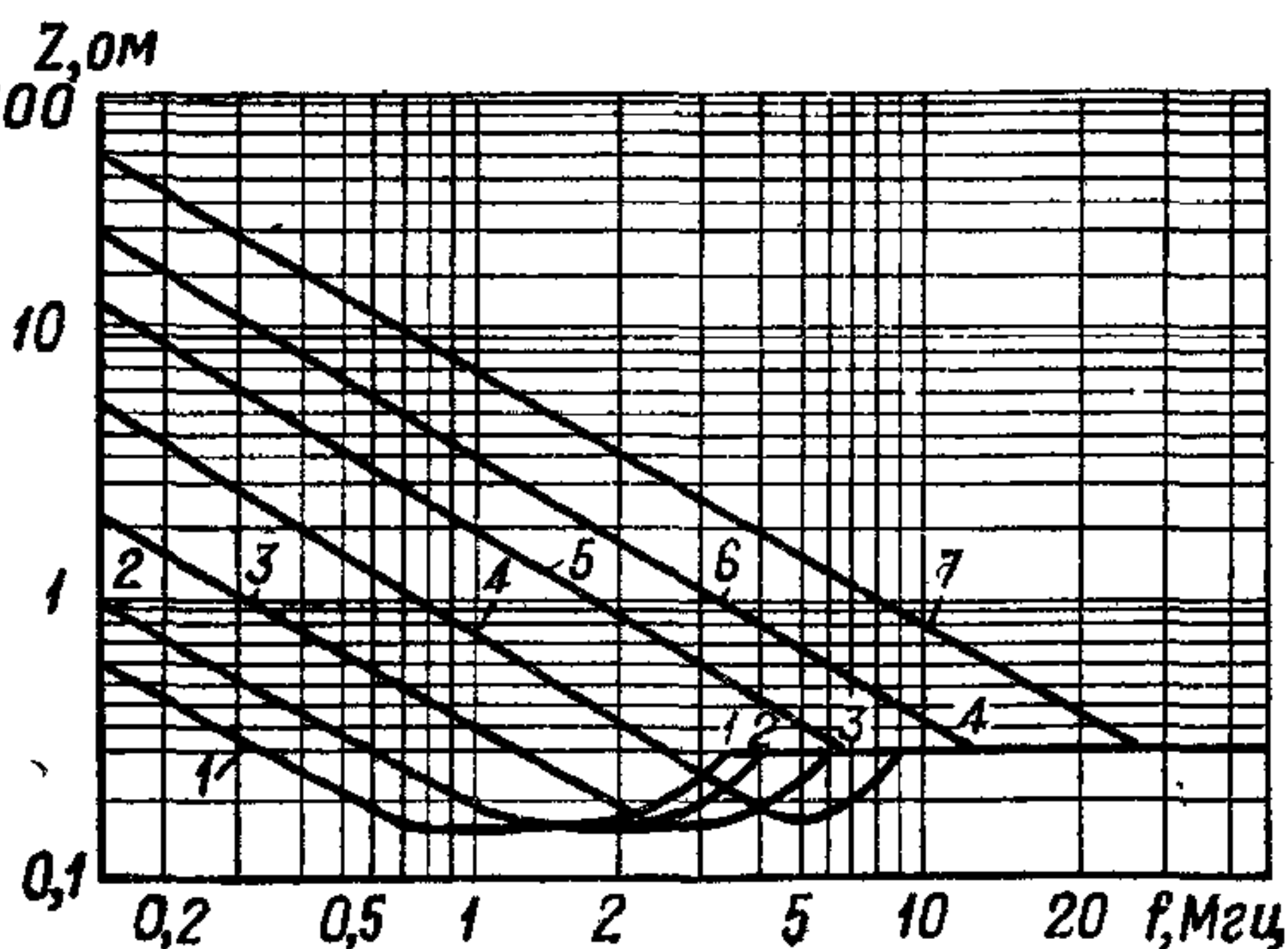


Рис. 238. Зависимость полного сопротивления конденсаторов типа КБП от частоты при разных значениях номинальной емкости.

1 — 2 мкф; 2 — 1 мкф; 3 — 0,5 мкф; 4 — 0,25 мкф; 5 — 0,1 мкф; 6 — 0,05 мкф; 7 — 0,025 мкф.

Выше были указаны значения $E_{\text{раб}}$ для бумажных конденсаторов при работе в цепях переменного и постоянного тока. Кратковременная электрическая прочность при постоянном токе значи-

тельно выше этих значений и доходит до 200—250 кВ/мм (рис. 107, кривая 2); импульсная прочность при воздействии одиночных стандартных импульсов немного больше, чем $E_{\text{пр}}$ при кратковременном воздействии постоянного напряжения; при частоте 50 гц эффективное значение $E_{\text{пр}}$ обычно примерно в 2 раза ниже, чем $E_{\text{пр}}$ при постоянном токе. Указанные здесь цифры относятся к пропитке жидким диэлектриком и мало зависят от типа жидкости, при пропитке твердой массой $E_{\text{пр}}$ может заметно снизиться. Поэтому и значения $E_{\text{раб}}$ при твердой пропитке приходится снижать в сравнении с указанными выше значениями, которые относятся также к конденсаторам, пропитанным жидкими массами (или вазелином).

Тип пропиточной массы может существенно влиять на зависимость емкости и угла потерь бумажного конденсатора от температуры, как показывает рис. 239, а, по данным США. На рис. 239, б представлена зависимость постоянной времени бумажных конденсаторов фирмы «Икар» (Италия) от температуры при разных видах пропитки: 1 — поливинилкарбазолом, 2 — нефтяным маслом и 3 — хлордифенилом; при пропитке касторовым маслом постоянная времени будет ниже, чем при пропитке хлордифенилом; при пропитке октолом можно получать данные того же порядка, как при пропитке поливинилкарбазолом; характеристики конденсаторов, пропитанных эпоксидной смолой, показаны также выше

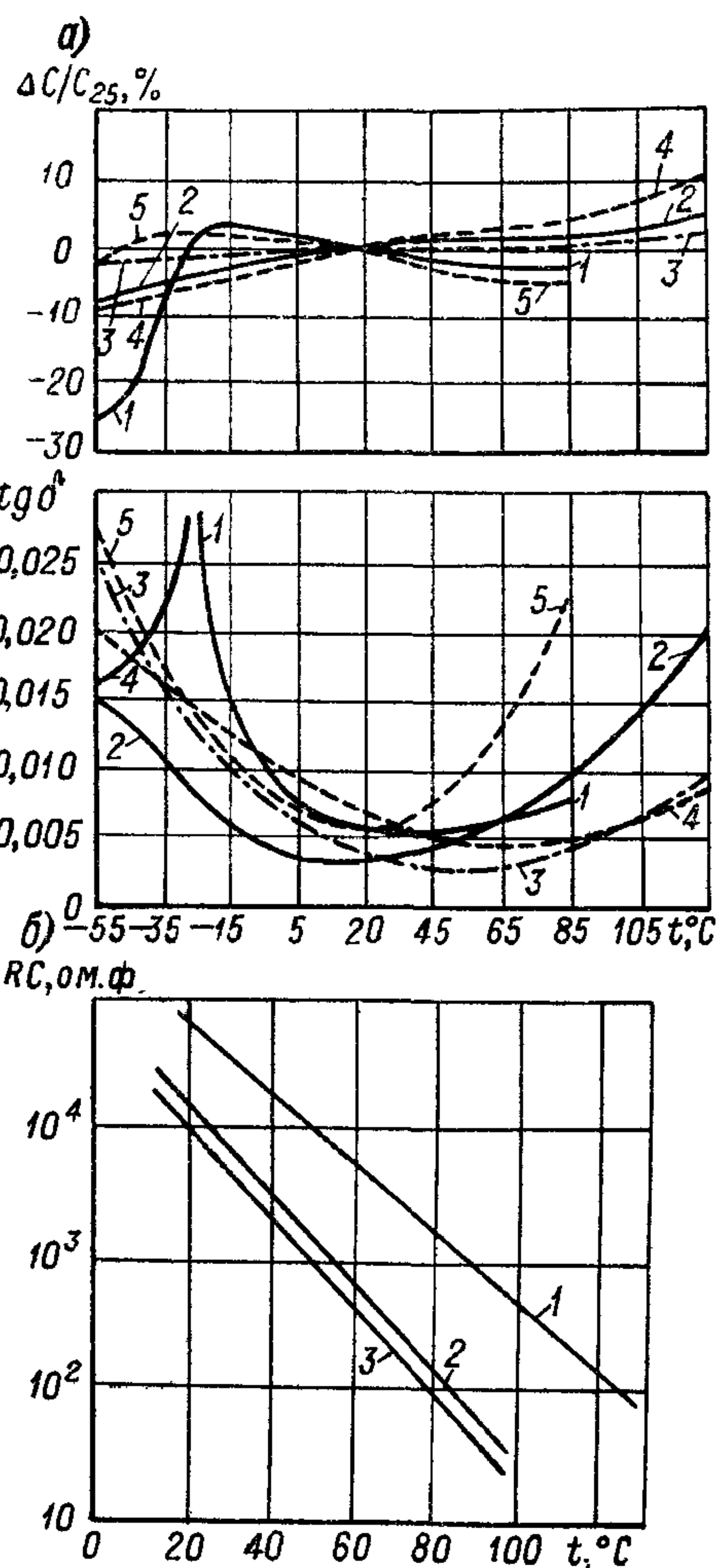


Рис. 239. Температурные характеристики бумажных конденсаторов, пропитанных различными массами: а — зависимость емкости и угла потерь для американских конденсаторов от температуры при частоте 50 гц при следующих видах пропитки.

1 — хлордифенил; 2 — масло; 3 — полиизобутилен; 4 — эпоксидная смола; 5 — хлорнафталин;

б — зависимость постоянной времени итальянских конденсаторов фирмы «Икар» от температуры (пояснения обо значения кривых — в тексте).

(рис. 219). Частотная зависимость угла потерь, показанная на рис. 231 (выше), относится к конденсатору с неполярной пропиткой и выступающей обкладкой (т. е. с пониженными потерями в обкладке); при намотке со скрытой обкладкой и при пропитке полярной массой потери могут значительно более резко возрастать с частотой, чем показано на рис. 231, особенно при больших емкостях. Частотная зависимость емкости в основном может проявиться при низких температурах как за счет изменения ϵ_k клетчатки (рис. 201), так и за счет изменения ϵ_d полярных пропиточных масс (рис. 216 и 218). Изменение емкости бумажных конденсаторов при длительной работе или хранении обычно не превышает нескольких процентов от исходного значения (см. § 9).

§ 81. Металлобумажные конденсаторы

Название **м е т а л л о б у м а ж н ы х** получили бумажные конденсаторы, в которых в качестве обкладок, вместо фольги, используется тонкий слой металла, нанесенный на бумагу методом испарения в вакууме (§ 22). Выше отмечалось, что наличие в бумаге токопроводящих частиц не позволяет изготавливать бумажные конденсаторы с обкладками из фольги, имеющие лишь один слой бумаги между обкладками (§ 76). При замене фольги тонким слоем металла вследствие явления **с а м о в о с с т а н о в л е н и я**, свойственного металлизированным конденсаторам (§ 23), можно изготавливать **о д н о с л о й н ы е м е т а л л о б у м а ж н ы е к о н д е н с а т о р ы** с рабочим напряжением того же порядка, что и у двухслойных бумажных конденсаторов с обкладками из фольги. Переход от двух слоев бумаги к одному, т. е. снижение толщины диэлектрика в два раза, должно давать уменьшение объема конденсатора в 4 раза (§ 51), дополнительное снижение объема дает снижение толщины обкладок от 6—7 *мкм* до величины менее 0,1 *мкм*. Поэтому уже разработка первых типов металлобумажных конденсаторов при толщине бумаги 8 *мкм* позволила снизить удельный объем от 28 *см³/мкф* для бумажного конденсатора типа КБГ с рабочим напряжением 200 в до 5,6 *см³/мкф* для металлобумажного конденсатора типа КМБГ с таким же напряжением, т. е. получить увеличение удельной емкости в 5 раз. Позже для конденсаторов типа МБГО при напряжении 160 в был получен удельный объем 3,15 *см³/мкф* (величина $c_{уд} = 0,317$ *мкф/см³* и $q_{уд} = 48$ *мкк/см³*).

Если требуется повысить рабочее напряжение металлобумажного конденсатора, то можно применить дополнительную прокладку одного или нескольких слоев неметаллизированной бумаги, получив **м н о г о с л о й н ы й м е т а л л о б у м а ж н ы й к о н д е н с а т о р**. В таких конденсаторах выигрыш в объеме в сравнении с бумажными конденсаторами меньше, чем для однослойных, и составляет 2—3 раза вместо 5. Этот выигрыш обусловлен тем, что в многослойных металлобумажных конден-

саторах величину $E_{\text{раб}}$ можно увеличить по сравнению с бумажными в связи с повышением надежности благодаря появлению свойства самовосстановления. Это свойство исключает опасность пробоя при случайном перенапряжении и позволяет снизить запас электрической прочности, применив более тонкий диэлектрик.

Величины допускаемых значений напряженности поля $E_{\text{раб}}$ (постоянный ток) для конденсаторов МБГ при максимальной температуре 70°C и для конденсаторов МБГТ при максимальной температуре 100°C , приведенные здесь, можно сравнить с теми значениями, которые допускаются в бумажных конденсаторах с обкладками из фольги (§ 80).

Номинальное напряжение, в	Конденсаторы МБГ		Конденсаторы МБГТ	
	Толщина бумаги, мм	$E_{\text{раб}}$, кв/мм	Толщина бумаги, мм	$E_{\text{раб}}$, кв/мм
160	1×8	17,4 *	2×6	12,1
200	1×8	19,2	—	—
250	1×15	15,4 *	2×8	14,5
400	2×8	23,3	—	—
500	—	—	3×8	19,8
600	3×8	23,8	—	—
750	—	—	3×10	24
1000	3×10	32	4×10	24,3
1500	4×10	36,4	—	—

* Для однослойных конденсаторов на 160 и 250 в установлена рабочая температура 60°C вместо 70°C .

Сравнение показывает, что если при напряжениях 160—200 в толщина диэлектрика в металлобумажных конденсаторах снижена примерно в два раза, то при напряжении 1500 в — только на 20%. Это связано с тем обстоятельством, что при повышении рабочего напряжения и соответственном увеличении толщины диэлектрика в металлобумажном конденсаторе ухудшается его способность к самовосстановлению при пробое; если однослойные металлобумажные конденсаторы выдерживают несколько тысяч пробоев без заметного ухудшения своих электрических характеристик, то многослойные при $U_{\text{раб}} \approx 1000 \div 1500$ в (т. е. при 3—4 слоях бумаги) могут выдержать лишь несколько десятков пробоев, после чего может наступить короткое замыкание обкладок. Это объясняется тем, что с увеличением напряжения растет энергия конденсатора [формула (41)] и соответственно увеличивается доля энергии, выделяемая в месте короткого замыкания; часть этой энергии расходуется не только на расплавление и испарение металла вокруг точки короткого замыкания, но и на разрушение диэлектрика в этом участке. В связи с этим обычный верхний предел

рабочего напряжения для металлобумажных конденсаторов составляет 1500 в.

В последние годы начато изготовление металлобумажных конденсаторов и с более высоким рабочим напряжением за счет использования последовательного соединения секций, причем напряжение на каждой секции не превышает 1500—2000 в, т. е. толщина диэлектрика лежит в тех пределах, когда свойство самовосстановления еще сохраняется при нескольких десятках пробоев. При этом имеется возможность несколько повысить $E_{\text{раб}}$ по сравнению с бумажными конденсаторами высокого напряжения, получив снижение удельного объема в 1,5—2 раза, и соответственно увеличить удельную энергию.

При расчете значения $E_{\text{раб}}$ для металлобумажных конденсаторов надо учитывать, что перед металлизацией конденсаторная бумага обычно подвергается лакировке, причем на поверхности бумаги создается лаковая пленка толщиной порядка 1—1,2 мкм. За рубежом для лакировки обычно применяют ацетилцеллюлозный лак, реже — полистирольный, наше конденсаторостроение применяет этилцеллюлозный лак. Он обладает большей химической устойчивостью, чем ацетилцеллюлозный, и в то же время дает пленку с большей ϵ , чем полистирольный. Нанесение слоя металла в процессе металлизации ведется с лакированной стороны бумаги.

Лакировка бумаги перед металлизацией преследует несколько целей. Прежде всего ТПВ, имеющиеся в бумаге, могут иметь как высокую проводимость (частицы угля, металлическая пыль), так и относительно низкую (окислы металлов и другие полупроводники). Если сопротивление частицы мало, порядка долей ома, то к точке замыкания обкладок, обусловленной этой частицей, притечет большой ток короткого замыкания, величина которого достаточна для удаления обкладки вокруг точки короткого замыкания. Если сопротивление частицы велико, скажем порядка 1 Мом, то ток, протекающий по обкладке к такой частице, будет мал и не сможет удалить обкладку вокруг этой частицы, которая останется неизолированной. Поэтому при изготовлении однослойных металлобумажных конденсаторов из нелакированной бумаги трудно получить постоянную времени выше нескольких $\text{ом} \cdot \text{ф}$, так как оставшиеся неизолированными частицы полупроводникового характера будут шунтировать обкладки, создавая большую утечку. Наличие лаковой пленки изолирует такие частицы от обкладок. Кроме того, эта пленка заметно улучшает электрическую прочность бумажного диэлектрика, закрывая случайные сквозные отверстия в бумаге. Наконец, пленка лака служит барьером между тонким слоем металла, весьма чувствительным к коррозии, и содержащимися в бумаге остатками влаги, а также следами кислот, щелочей и иных активных веществ, способных вызвать коррозионное разрушение тонкой металлической обкладки. В приведенной выше таблице было показано, что при толщине бумаги 1×8 мкм рабочее напряжение составляет

160 в при 60°C ; это соответствует односторонней лакировке. Если применить двухстороннюю лакировку, т. е. дополнительно повысить $E_{\text{пр}}$ и обеспечить двухсторонний барьер, отделяющий слой металла от бумаги, то при той же толщине исходной бумаги можно поднять $U_{\text{раб}}$ до 200 в при 70°C .

Недостатком лакировки является то, что она затрудняет использование особо тонких бумаг (4—5 мм) для изготовления металлобумажных конденсаторов, поскольку прочность этих бумаг в смоченном состоянии оказывается недостаточной и приводит к чрезмерному числу обрывов на лакировочной машине.

Благодаря малой коррозионной устойчивости металлического слоя, особенно цинкового, для пропитки металлобумажных конденсаторов применяют **н е п о л я р н ы е** **м а с с ы** (церезин, вазелин, масло); полярные хлорированные массы считаются для этой цели непригодными, хотя есть сведения, что некоторые английские фирмы использовали хлорнафталин, по-видимому, только при алюминиевых обкладках. Полярная масса **л а н о с т е р о л**, разработанная в ФРГ (табл. 20), химически неактивна в отличие от хлорированных масс и нашла себе применение для пропитки металлобумажных конденсаторов. В последнее время некоторые фирмы отказались от применения ланостерола в связи с нестабильностью емкости конденсаторов во времени.

Надо иметь в виду, что применение пропитки массами с повышенной $\epsilon_{\text{п}}$ имеет смысл только для многослойных металлобумажных конденсаторов, содержащих одну или более прослоек из нелакированной и неметаллизированной бумаги. При лакировке бумага в значительной степени пропитывается лаком и ее впитывающая способность к другим пропитывающим массам уже настолько снижена, что изменение $\epsilon_{\text{п}}$ пропиточной массы мало изменяет емкость однослойного металлобумажного конденсатора. При неполярной пропитке для диэлектрика металлобумажного конденсатора можно принимать $\epsilon \approx 4 \div 4,5$.

Явление **с а м о в о с с т а н о в л е н и я** **п р и** **п р о б о е** металлобумажного конденсатора не обеспечивает возможности длительной работы такого конденсатора при напряжении, превышающем $U_{\text{ном}}$. Кратковременное приложение напряжения $U \gg U_{\text{ном}}$ действительно не опасно, так как если и вызовет пробой, то пробитое место почти мгновенно окажется изолированным от обкладок. Однако при длительном приложении такого напряжения начнутся систематические пробои и самовосстановления, число которых растет с увеличением напряжения (рис. 240); удаление части обкладки при каждом пробое, хотя и небольшое (порядка тысячных процента), постепенно приводит к снижению емкости. Особенно опасно удаление обкладки в тех участках, где она прилегает к торцовым контактными накладкам (см. рис. 41), при этом удлиняется путь тока по обкладке и увеличивается $\text{tg } \delta$. В конечном счете, если часть обкладки, прилегающая по всей длине к одной из торцовых накладок, будет разрушена,

то конденсатор «теряет емкость», т. е. между выводами будет «обрыв» (рис. 241).

Таким образом, металlobумажный конденсатор низкого напряжения отказывает в работе при повышении напряжения не вследст-

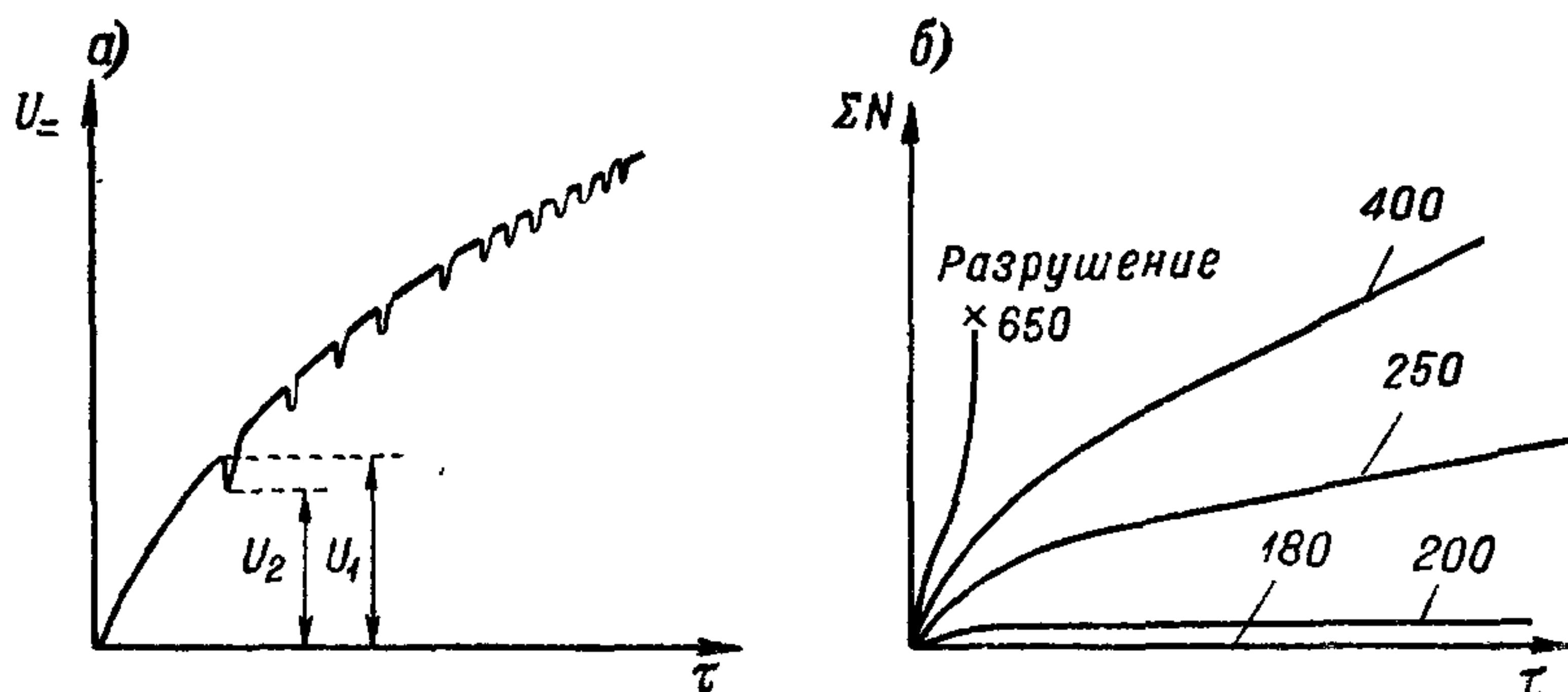


Рис. 240. Увеличение числа пробоев металlobумажного конденсатора с ростом приложенного к нему напряжения: а — осциллограмма, полученная при возрастании напряжения во времени; б — зависимость суммарного числа пробоев от времени при разных напряжениях (цифры у кривых — напряжение в вольтах).

вие пробоя и короткого замыкания (сопротивление между выводами равно нулю), как обычный конденсатор, а вследствие появления обрыва (сопротивление между

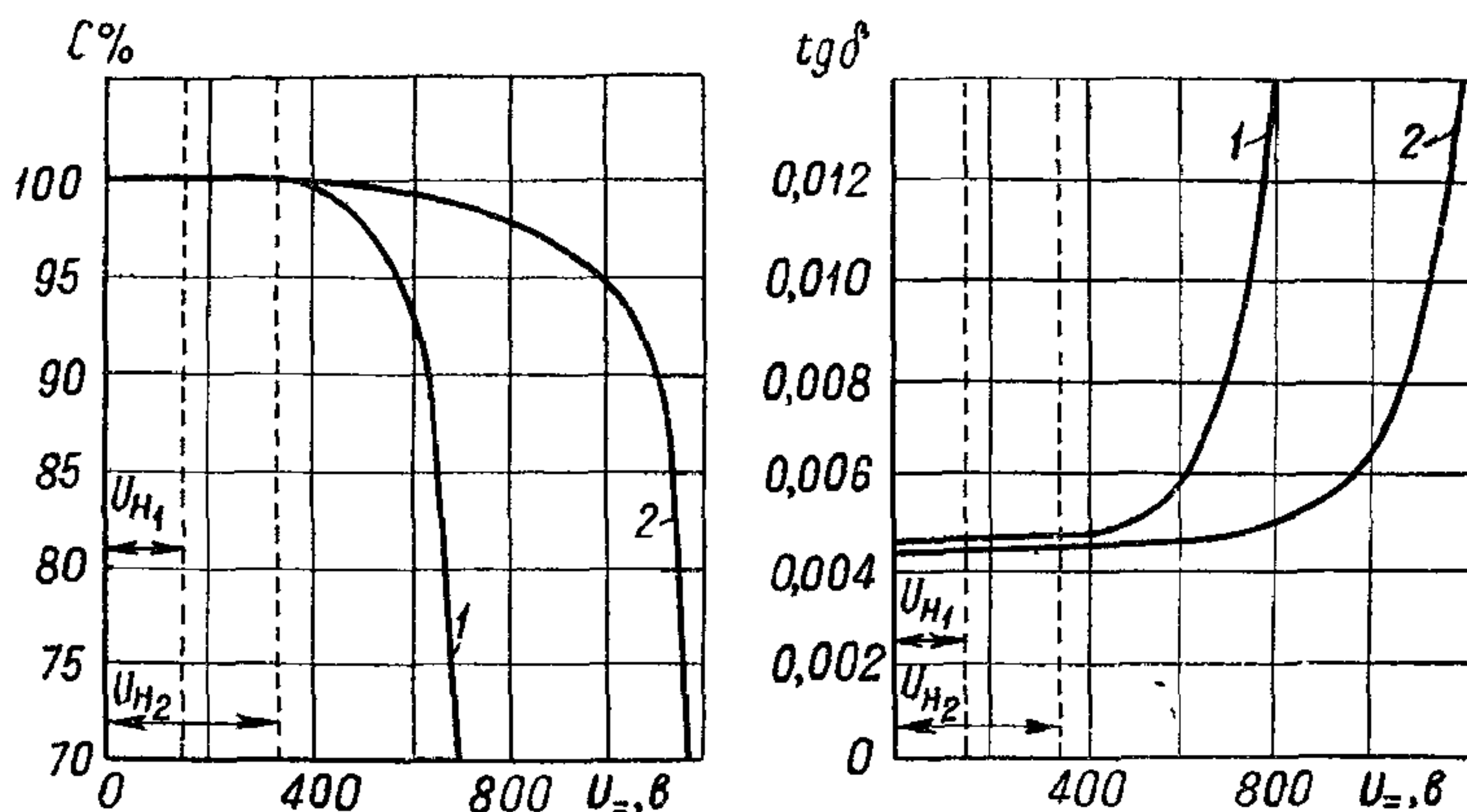


Рис. 241. Зависимость емкости и угла потерь металlobумажных однослойных конденсаторов от величины приложенного напряжения; напряжение повышалось ступенями по 50 в с выдержкой на каждой ступени 2 мин.

1 — $U_{\text{ном}} = 160 \text{ в}$; 2 — $U_{\text{ном}} = 250 \text{ в}$.

выводами — бесконечность). В многослойных металlobумажных конденсаторах с высоким рабочим напряжением после ряда пробоев и самовосстановлений происходит короткое замыкание обкладок так же, как в бумажных фольговых конденсаторах.

Обычно $U_{\text{ном}}$ металлобумажных конденсаторов устанавливается с таким расчетом, чтобы в условиях работы пробой конденсатора не имели места или носили бы случайный, единичный характер. Некоторые зарубежные фирмы, называя это напряжение «высоко-надежным», считают возможным для менее ответственных случаев повышать $U_{\text{ном}}$ до таких значений, при которых на линейном участке кривой зависимости числа пробоев от времени (рис. 240, б) происходит не более 8 пробоев в час; такое напряжение называют «рабочим напряжением обычной надежности», оно может превышать напряжение «высокой надежности» примерно на 60%.

Повышенная надежность металлобумажных конденсаторов при воздействии случайных перенапряжений позволяет снизить отношение $U_{\text{ис}}/U_{\text{ном}}$; обычно для конденсаторов этого типа принимают $U_{\text{ис}} = 1,5U_{\text{ном}}$ вместо $U_{\text{ис}} = 2 \div 3U_{\text{ном}}$, как у фольговых конденсаторов. Температурная стабильность емкости металлобумажных конденсаторов (рис. 242, а) примерно такая же, как у фольговых конденсаторов; для многослойных конденсаторов большее количество впитанной неполярной пропиточной массы дает несколько усиленное снижение емкости в области повышенных температур. Хотя сопротивление тонкого слоя металла резко увеличено по сравнению с сопротивлением фольги, применение подвода тока с торцов (как в случае конденсатора с выступающей фольгой, рис. 20, б и рис. 41) позволяет ограничивать потери в обкладках. Поэтому норма на угол потерь для металлобумажных конденсаторов ($\text{tg } \delta \leq 0,015$) близка к норме для фольговых герметизированных конденсаторов ($\text{tg } \delta \leq 0,010$). У однослойных конденсаторов $\text{tg } \delta$ несколько выше, чем у многослойных, за счет большего влияния потерь в лаковой пленке. Практически различие в величинах $\text{tg } \delta$ для металлобумажного и обычного бумажного конденсатора делается заметным лишь при частотах порядка 5—10 кГц и выше.

Постоянная времени у однослойных металлобумажных конденсаторов заметно понижена по сравнению с бумажными конденсаторами, даже при наличии лакировки для герметизированных конденсаторов норма составляет 200 Мом·мкф (как для бумажных негерметизированных), для многослойных металлобумажных конденсаторов норма на постоянную времени 1000 Мом·мкф; по этой характеристике они мало отличаются от обычных бумажных герметизированных конденсаторов. При повышенных температурах для многослойных конденсаторов установлена заметная зависимость $\tau_c = R_{\text{из}}C$ от напряженности поля (рис. 242, в).

По данным П. А. Торощина, зависимость постоянной времени этих конденсаторов от температуры и напряженности поля можно выразить уравнением

$$RC = (RC)_0 e^{-[\alpha(t - t_0) + \beta(E - E_0)]}, \quad (279)$$

где $(RC)_0$ — постоянная времени при температуре t_0 и напряженности E_0 , а α и β — константы: $\alpha = 0,086$, $\beta = 0,045$. Полагая

$E = E_0$, получим формулу, характеризующую зависимость постоянной времени от температуры. Применяя ее для однослойных конденсаторов, надо принимать $\alpha = 0,075$. Выше (§ 23) отмечалась неустойчивость постоянной времени однослойных конденсаторов при хранении без напряжения или при

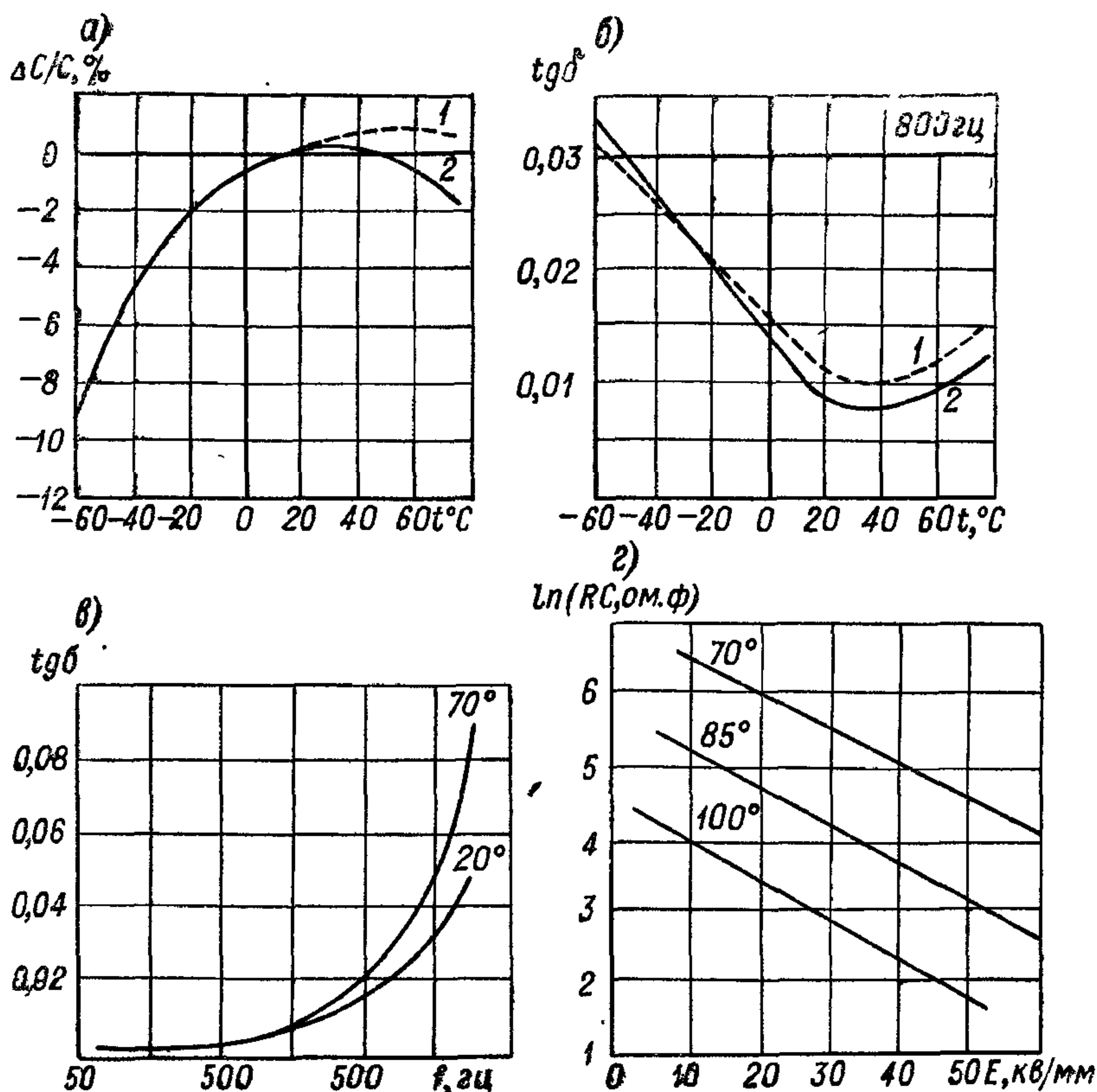


Рис. 242. Электрические свойства металлобумажных конденсаторов:
а — зависимость емкости от температуры

(1 — однослойные; 2 — многослойные конденсаторы);

б — зависимость угла потерь от температуры (обозначения кривых — те же); в — зависимость угла потерь от частоты при двух температурах; г — зависимость постоянной времени от напряженности поля при трех температурах.

работе под напряжением много меньше номинального или же при наличии большого сопротивления, включенного в схеме последовательно с конденсатором, т. е. во всех тех случаях, когда способность к самовосстановлению не может проявиться. Иногда при этом RC снижается до величины менее 50 $\text{Мом} \cdot \text{мкф}$, а в отдельных случаях до нуля. Приложение номинального напряжения обычно восстанавливает нормальное значение RC , но это не всегда может

устроить заказчика. В связи с этим в ФРГ, по-видимому, отказались от изготовления однослойных конденсаторов для работы в цепях постоянного тока; для того чтобы сохранить малые габариты двухслойных конденсаторов при нижнем пределе рабочего напряжения, подобные тем, которые были характерны для однослойных, применена пропитка полярной массой — ланостеролом (§ 77). У многослойных конденсаторов постоянная времени достаточно устойчива, но после длительной работы при повышенных температурах и номинальном напряжении у них начинает снижаться емкость и может вырасти $\operatorname{tg} \delta$, чем и ограничивается их срок службы. Это явление объясняется электрохимическим повреждением обкладки, скорость разрушения которой может быть выражена уравнением, определяемым законом Фарадея:

$$-\frac{d\delta}{d\tau} = \frac{U\varepsilon M}{6,4DR_{из}Cn\gamma}, \quad (280)$$

где δ — толщина металлического слоя в Å, τ — время в сутках, U — приложенное постоянное напряжение в в, ε — диэлектрическая проницаемость диэлектрика конденсатора, M — атомный вес металла обкладок, n — валентность металла, γ — плотность металла, D — толщина диэлектрика в мкм, $R_{из}C$ — постоянная времени конденсатора в Мом · мкф.

Для того чтобы обеспечить достаточную стабильность емкости при длительной работе и ослабить зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от частоты, надо увеличивать толщину слоя металла, но при этом затрудняется процесс самовосстановления. При металлизации цинком обычно применяют толщину слоя порядка 0,01—0,08 мкм, что соответствует проводимости слоя порядка 0,2—1,5 ом⁻¹.

При использовании металлизированной бумаги в импульсных конденсаторах возникает опасность обгорания слоя металла возле вводных контактов (рис. 243) при разряде конденсатора, когда через конденсатор кратковременно протекают большие разрядные токи. В этом случае можно применить утолщение слоя металла у края обкладки, сохраняя малую толщину на основной площади для обеспечения хорошего самовосстановления. Для этой цели используют испарители специальной формы. Повышенную толщину слоя металла у края обкладки применяют также в металлобумажных конденсаторах переменного напряжения. Основной трудностью изготовления таких конденсаторов является ухудшение внутренней теплопроводности конденсаторной секции при замене фольги тонким слоем металла. В фольговом конденсаторе значения коэффициентов теплопровод-

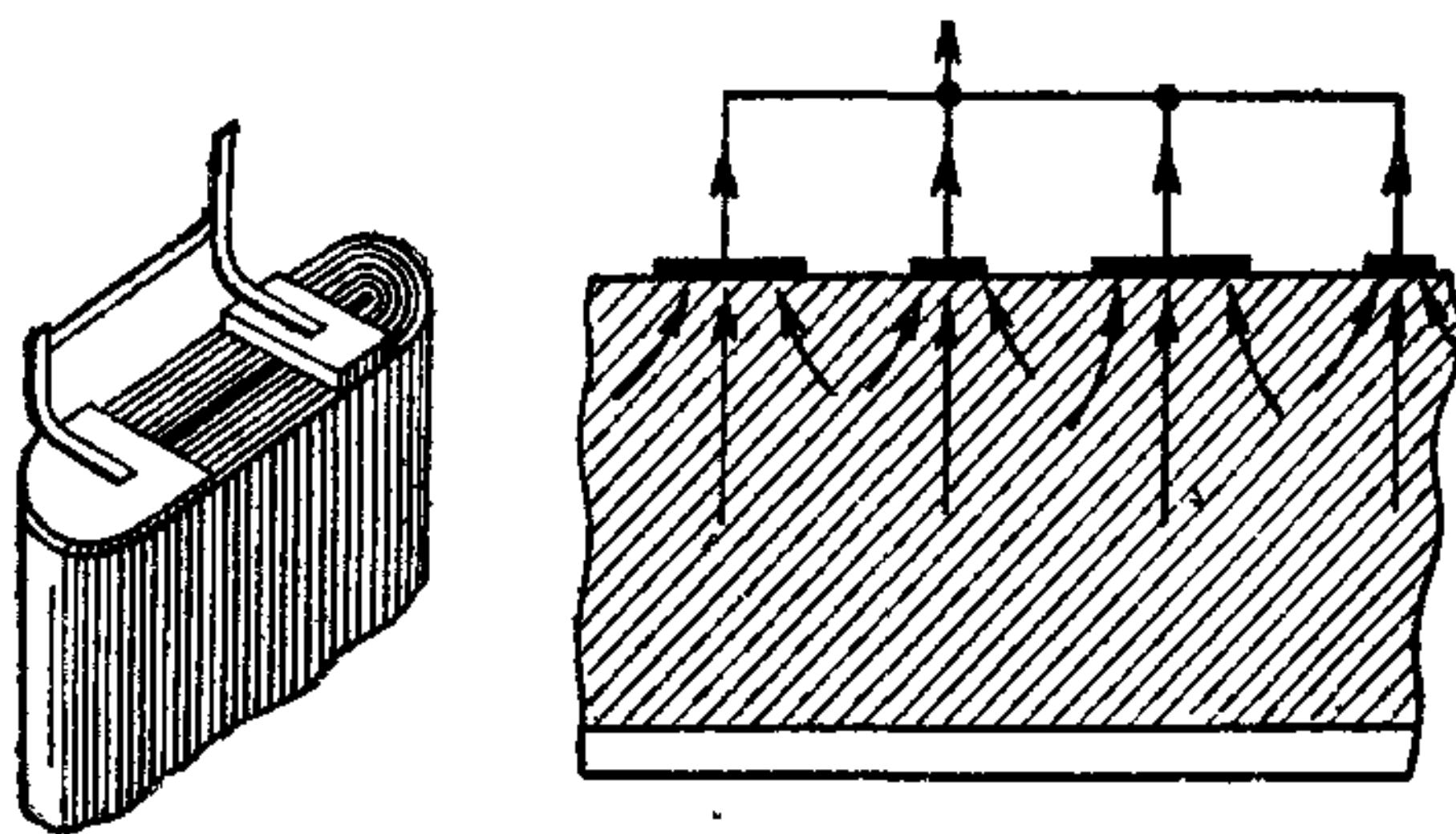


Рис. 243. Схема распределения тока в обкладке металлобумажного конденсатора при его разряде замыканием на малое сопротивление.

ности λ_{\perp} и λ_{\parallel} [см. формулы (222) и (223)] резко различны и величина λ_{\perp} приближается к величине $\lambda_{\text{ф}}$ для алюминия, обеспечивая хороший отвод тепла из секции в направлении, параллельном слоям бумаги и фольги; в металлобумажном конденсаторе значения λ_{\perp} и λ_{\parallel} близки и мало отличаются от величины $\lambda_{\text{б}}$ для бумажного диэлектрика, а потому отвод тепла из секции резко ухудшен. В связи с этим металлобумажные конденсаторы для работы при переменном напряжении изготовлялись лишь небольших размеров, на небольшую реактивную мощность и напряжением порядка сотен вольт.

За рубежом подобные конденсаторы достаточно широко применяют для маломощных конденсаторных электродвигателей (рис. 27) и для устройств люминесцентного освещения; в СССР для использования в электронной аппаратуре разработана серия МБГЧ для работы при напряжениях 250—1000 в и частоте 50 гц; емкость от 0,25 до 10 мкф. Для устранения опасности ионизации напряжение на одну секцию не превышает 250 в (при напряжениях более 250 в секции соединены последовательно). При пропитке вазелином величина $E_{\text{раб}}$ составляет 15—20 кв/мм. Для улучшения распределения напряжения между отдельными частями диэлектрика в этих конденсаторах используется нелакированная бумага.

В последнее время в ФРГ начат также выпуск силовых металлобумажных конденсаторов мощностью до 50 квар на напряжение порядка нескольких киловольт при частоте 50 гц; конденсаторы собирают из большого числа относительно небольших цилиндрических секций, соединяемых в последовательно-параллельные группы (при пропитке маслом напряжение на одну секцию порядка 400—500 в); большие зазоры между секциями образуют масляные каналы, улучшающие отвод тепла к стенкам корпуса. При этом удельный объем металлобумажного конденсатора не удастся снизить по сравнению с бумажнофольговым силовым конденсатором; преимуществом металлобумажного конденсатора является: увеличение надежности при перенапряжениях за счет явления самовосстановления, резкое сокращение расхода металла для обкладок и некоторое уменьшение расхода бумаги в сравнении с обычными бумажномасляными силовыми конденсаторами. Новые достижения в области изготовления конденсаторов, пропитанных новыми типами хлорированных масс, с использованием бумаги с малыми потерями, а также применение пленочнобумажного диэлектрика, могут ограничить возможности развития силовых металлобумажных конденсаторов. Фирма Бош начала выпуск силовых конденсаторов на 380 в, 30 квар с диэлектриком из металлизированной бумаги и синтетической пленки (ETZ В, 1966, № 13, 500).

Особенностями технологии производства металлобумажных конденсаторов, кроме проведения операции лакировки бумаги и ее металлизации, является также операция контактирования торцов секций после их намотки путем нане-

сения на них контактных накладок методом шоопирования. Предварительная сушка конденсаторов на воздухе не производится. В процессе вакуумной сушки сначала дается вакуум при умеренном обогреве сушильного бака, а затем, когда большая часть влаги удалась, повышается температура до необходимого значения. Если сразу дать высокую температуру, когда в секциях еще много влаги, то возникает опасность коррозии тонкого слоя цинка. После пропитки однослойные секции подвергаются операции «тренировки напряжением» для выжигания обкладок вокруг слабых мест диэлектрика. До этой операции большинство однослойных секций имеет короткое замыкание обкладок. Тренировка производится на специальных автоматах или полуавтоматах в две ступени: сначала подается напряжение небольшой величины (порядка 100 в) от источника тока с большой емкостью на выходе (порядка 500 мкф); при этом изолируются от обкладок слабые места с большой проводимостью, затем подается напряжение, равное 1,5 $U_{ном}$ от источника, имеющего на выходе емкость порядка 10 мкф; при этом изолируются слабые места с пониженной электрической прочностью, но с небольшой проводимостью. Тренировочный автомат обычно снабжается устройством для разбраковки конденсаторов по величине постоянной времени. Многослойные секции, как правило, тренировке не подвергаются.

При пропитке твердой массой — церезином — сборка секций металlobумажных конденсаторов в корпусах проводится после сушки и пропитки, при пропитке полужидкими или жидкими массами сушка и пропитка производятся после сборки.

Таблица 22*

Металlobумажные конденсаторы

Тип	$C_{ном}, мкф$	$U_{ном}, в$	Максимальный заряд		$t_{макс}, ^\circ C$	Конструкция
			мкк	мкк/см ³		
МБГ	0,025—30	160—1500	15 000	20	70	Герметизированная
МБГТ	0,1—20	160—1000	10 000	15	100	»
МБГО	0,25—30	160—600	10 000	70	60	»
МБМ	0,005—1	160—1500	250	26	70/85	Уплотненная
К42У-2	0,0047—1	160—1600	250	24	70/100	Герметизированная
МБГЧ	0,25—10	250—1000 *	—	—	70	»

* См. примечание к табл. 15.

Некоторые данные о металlobумажных конденсаторах, выпускаемых в СССР, приведены в табл. 22. Допускаемые отклонения емкости от номинала $\pm 5; \pm 20\%$.

Для конденсаторов МБМ и К42У-2 номинальное напряжение установлено для температуры 70°C и срока службы 4000—5000 ч. При сокращении срока службы и температуре 70°C напряжение может быть повышено; наоборот, при снижении напряжения может быть повышена рабочая температура до 85°C и даже до 100°C . Соотношение между $U_{\text{ном}}$ и величинами допускаемого напряжения при различных значениях температу-

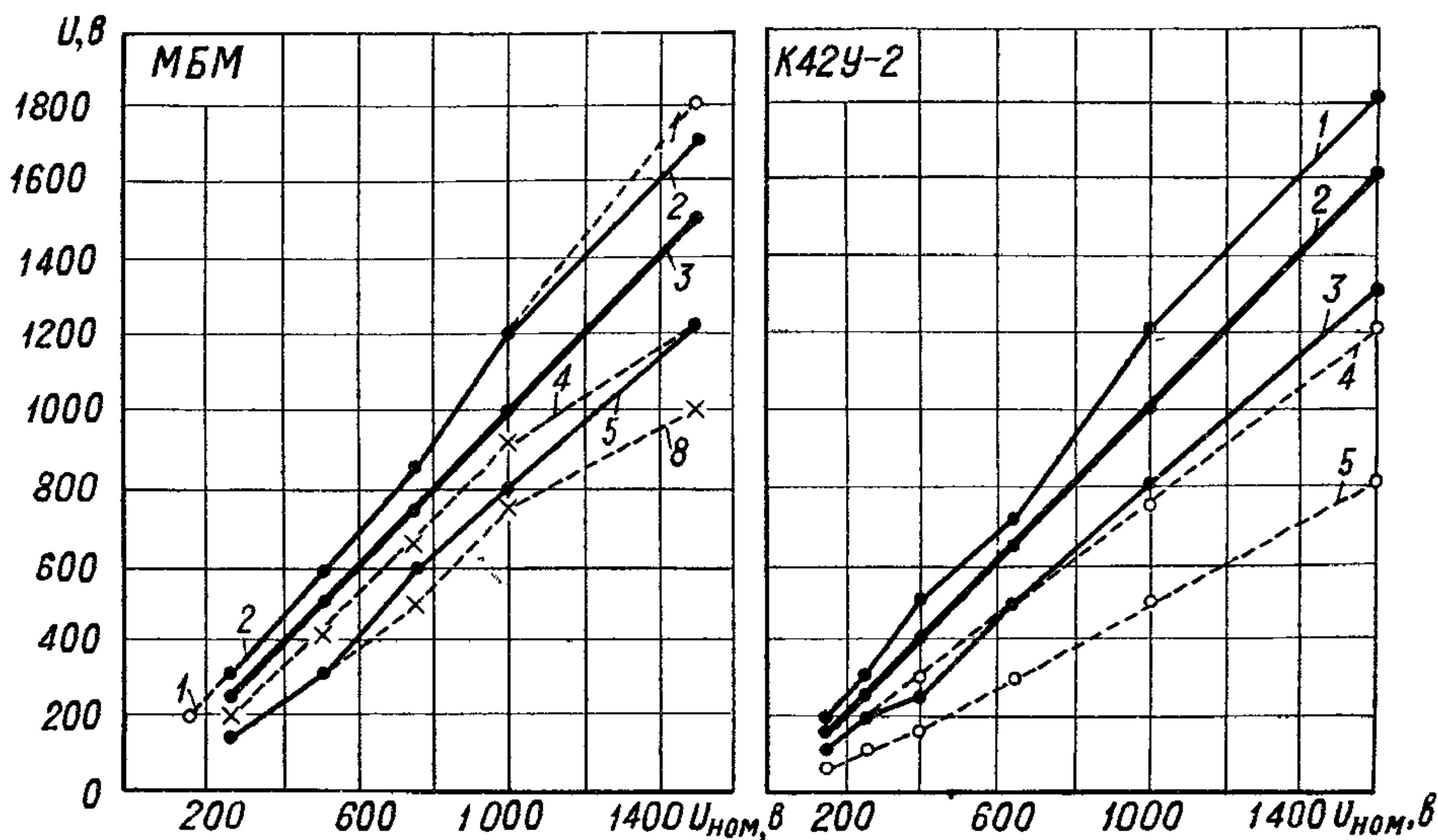


Рис. 244. Допускаемое напряжение конденсаторов МБМ и К42У-2 при различных режимах работы в зависимости от номинального напряжения, установленного для 70°C и срока службы 4000—5000 ч.

Для МБМ: 1 — 500 ч при 70°C ; 2 — 50 ч при 85°C ; 3 — 500 ч при 85°C ; 4 — 50 ч при 100°C ; 5 — 5000 ч при 85°C ; 6 — 500 ч при 100°C . Для К42У-2: 1 — 50 ч при 85°C или 500 ч при 70°C ; 2 — 50 ч при 100°C или 500 ч при 85°C ; 3 — 4000 ч при 85°C ; 4 — 500 ч при 100°C ; 5 — 4000 ч при 100°C .

ры для этих типов металобумажных конденсаторов показано на рис. 244.

При использовании металобумажных конденсаторов при пульсирующем напряжении ограничения по величине допускаемой амплитуды переменной составляющей принимаются такими же, как и для бумажных конденсаторов КБГ (§ 80), с тем различием, что оговаривается частота пульсаций не выше 1000 гц, а для малогабаритных конденсаторов МБМ даже не выше 400 гц. Так же как и для бумажных конденсаторов, предусматривается, что сумма постоянного напряжения и амплитуды переменной составляющей не должна превышать $U_{\text{ном}}$.

Более подробные сведения о металобумажных конденсаторах можно найти в книге П. А. Торощина (1965 г.).

Б. ПЛЕНОЧНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

§ 82. Синтетические пленки, применяемые в конденсаторостроении

Современная химия, развитию которой в нашей стране Партия и Правительство уделяют особое внимание, разработала большой ряд синтетических материалов, представляющих собой **высокомолекулярные соединения**. Эти материалы, состоящие из длинных полимерных молекул, позволяют изготавливать тонкие пленки в рулонной форме, используя для этого различные технологические приемы. Из таких пленок можно изготавливать конденсаторы намотанного типа, подобные бумажным по конструкции, но отличающиеся от них улучшенными электрическими свойствами или повышенной нагревостойкостью. Многие из синтетических пленок допускают металлизацию тем же методом, который применяется для металлизации бумаги, что позволяет изготавливать **металлопленочные конденсаторы**, обладающие, как и металлобумажные, свойством самовосстановления при пробое, хотя для некоторых синтетических пленок это свойство выражено слабее, чем для конденсаторной бумаги (§ 23).

Как уже отмечалось в § 75, можно различать два основных типа синтетических пленок, применяемых современным конденсаторостроением: неполярные и полярные.

Некоторые сведения о синтетических высокомолекулярных соединениях, применяемых для изготовления **неполярных пленок**, приведены в табл. 23.

Как показывают данные табл. 23, неполярные пленки отличаются небольшой ϵ : от 2—2,2 до 2,5—2,7 и малым $\operatorname{tg} \delta \approx 5 \div 6 \cdot 10^{-4}$, удельное сопротивление их весьма высоко: порядка 10^{17} — 10^{19} *ом·см*. Таким образом, по электрическим свойствам они являются высокочастотными материалами и резко отличаются от бумаги. По механическим свойствам они уступают бумаге, имея σ_p меньше 900—1000 *кг/см²*, по величине удлинения пленки из полистирола и САМП подобны бумаге (удлинение 2—3%); пленки из полиолефинов (полиэтилена и полипропилена) и из фторированных соединений в отличие от бумаги эластичны и имеют удлинение порядка 50—100% и даже выше. Это создает некоторые неудобства при намотке из них конденсаторных секций. По нагревостойкости некоторые из этой группы пленок уступают бумаге (полистирол), а другие не отличаются от нее или даже резко превосходят бумагу (фторированные соединения, полипараксилилен).

Будучи неполярными веществами, все пленки этой группы имеют отрицательный ТК ϵ [формула (26)], величина $\operatorname{tg} \delta$ слабо зависит от температуры и только вблизи от температуры размягчения можно заметить возрастание угла потерь (см. рис. 56, а); ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ неполярных пленок не зависят от частоты в широком диапазоне ее изменения.

Материалы, применяемые для изготовления неполярных пленок

Таблица 23

Название	Химическая формула	γ , г/см ³	$t_{\text{макс}}$, °C	ϵ (1 кГц)	$\text{tg } \delta \times 10^4$ (1 кГц)	$\rho_{\text{об}}$, ом·см
Полистирол		1,05	60—70	2,5—2,6	2—4	10 ¹⁹
САМП*		1,05	85—90	2,6—2,7	3—4	10 ¹⁸
Полиэтилен		0,91—0,96	90—110 **	2,2—2,25	4—5	10 ¹⁷
Полипропилен		0,89—0,90	100—110	2,2—2,3	3—6	10 ¹⁷
Политетрафторэтилен		2,15	200—250	2,0—2,1	1—3	10 ¹⁹
Тефлон FEP***		2,15	180—200	2,1—2,2	2—5	10 ¹⁸
Полипараксилилен		1,12	180—200	2,6—2,7	2—5	10 ¹⁸
Полифенилен-оксид		—	125	2,6	4—6	10 ¹⁷

* Сополимер стирола и метилстирола.
 ** После облучения.
 *** Сополимер тетрафтор- и гексафторэтилена.

Первой из неполярных пленок, нашедших применение в конденсаторостроении, явилась пленка из полистирола. Впервые высокие электрические свойства этого материала были изучены в СССР, но промышленный выпуск гибкой полистирольной пленки (стирофлекса) был впервые освоен в Германии в 30-е годы. Первые попытки получить пленку из полистирола из раствора потерпели неудачу, так как пленка имела малую прочность и ломалась после первого перегиба. Это можно объяснить тем, что длинные полимерные молекулы полистирола закручиваются в клубки, между которыми ослаблены связи, что и снижает прочность. Для получения гибкой пленки расплавленный полистирол продавливается через щель, образуя пленку, которая попадает на растягивающее приспособление, где получает в горячем виде как продольную, так и поперечную вытяжку.

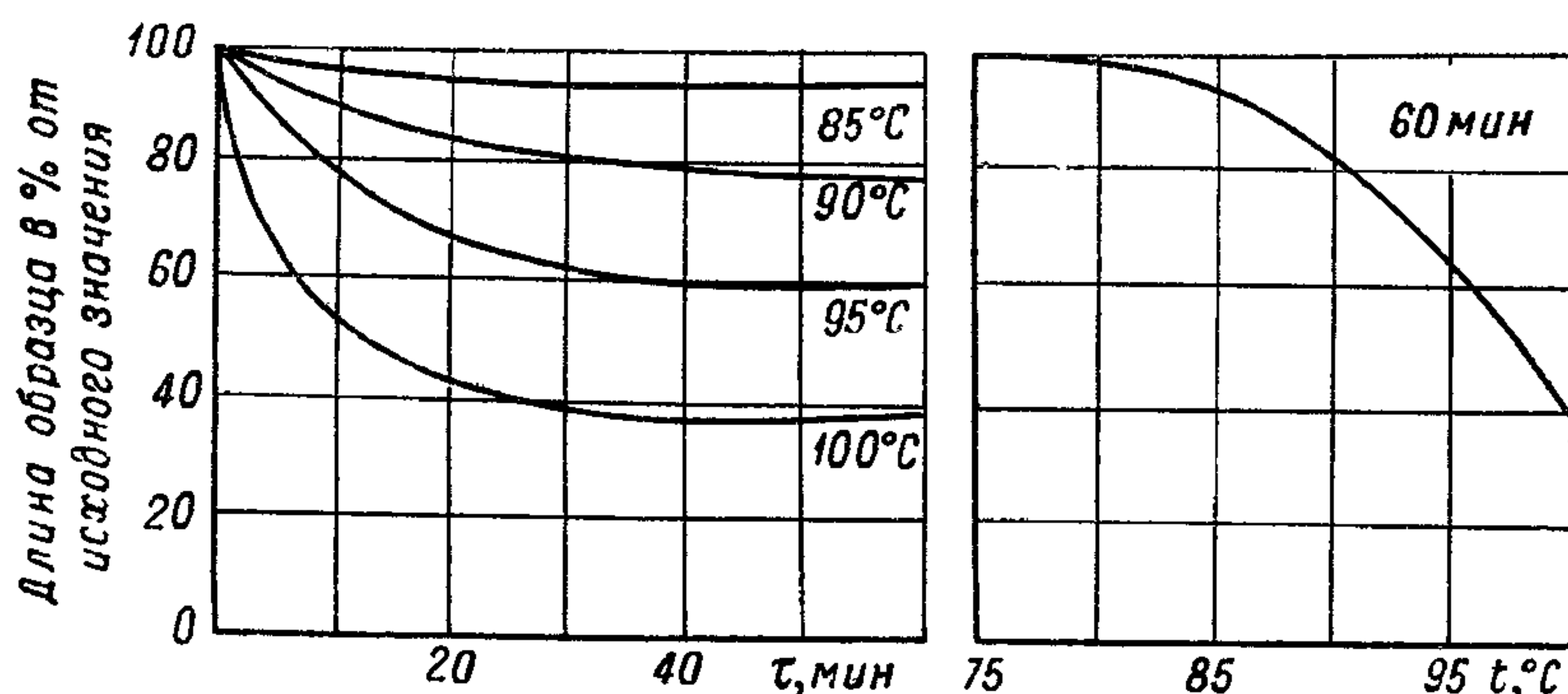


Рис. 245. Зависимость усадки ориентированной полистирольной пленки от времени прогрева и от температуры.

Вытянутые при продавливании и растяжке молекулы при охлаждении пленки закрепляются в ней в вытянутом состоянии, что резко улучшает механические свойства; такая ориентированная пленка выдерживает несколько сотен перегибов до разрушения. Минимальная толщина полистирольной пленки — у нас 20 мкм, за рубежом 8—10 мкм.

Если нагреть ориентированную пленку до температуры, близкой к размягчению, то она дает большую усадку, до 50% по длине, за счет возвращения молекул к исходной клубкообразной форме. Величина усадки зависит от температуры и времени прогрева (рис. 245). Это явление используют для улучшения стабильности емкости конденсаторов, намотанных из ориентированной пленки, путем их прогрева при повышенной температуре, вызывающей усадку пленки; при этом витки секции сжимаются, вытесняя значительную часть воздуха из зазоров между слоями пленки и между пленкой и фольгой, что способствует стабилизации величины емкости (рис. 246).

Полистирол позволил изготавливать пленочные конденсаторы с малым углом потерь, стабильной емкостью и высокой постоянной

времени, по низкой рабочей температурой, всего 60°C . Зарубежная полистирольная пленка улучшенной нагревостойкости, изготовленная из материала высокой чистоты с повышенной степенью полимеризации, дает повышение рабочей температуры лишь до 70°C . Некоторые фирмы в США указывали для полистирольных конденсаторов рабочую температуру до 85°C , но при этом уже не обеспечивается высокая стабильность емкости.

Для повышения нагревостойкости было опробовано несколько вариантов сополимеризации стирола с более жесткими и нагревостойкими компонентами. В СССР удачные результаты были получены при сополимеризации стирола с метилстиро-

лом. Из этого сополимера, названного САМП, можно получать пленку, подобную полистирольной по электрическим свойствам, но позволяющую изготовить из нее конденсаторы с верхним пределом температуры до $90\text{--}100^{\circ}\text{C}$.

Полиэтилен нашел себе широкое применение в кабельной промышленности, но может быть также получен и в виде конденсаторной пленки, изготовляемой методом выдувания. Расплавленный полиэтилен вжимается в камеру вытянутой формы и с помощью сжатого воздуха прижимается к ее стенкам, образуя по форме камеры вытянутую тонкостенную «колбаску»; далее она на вальцах прокатывается в длинную двойной толщины ленту, которая да-

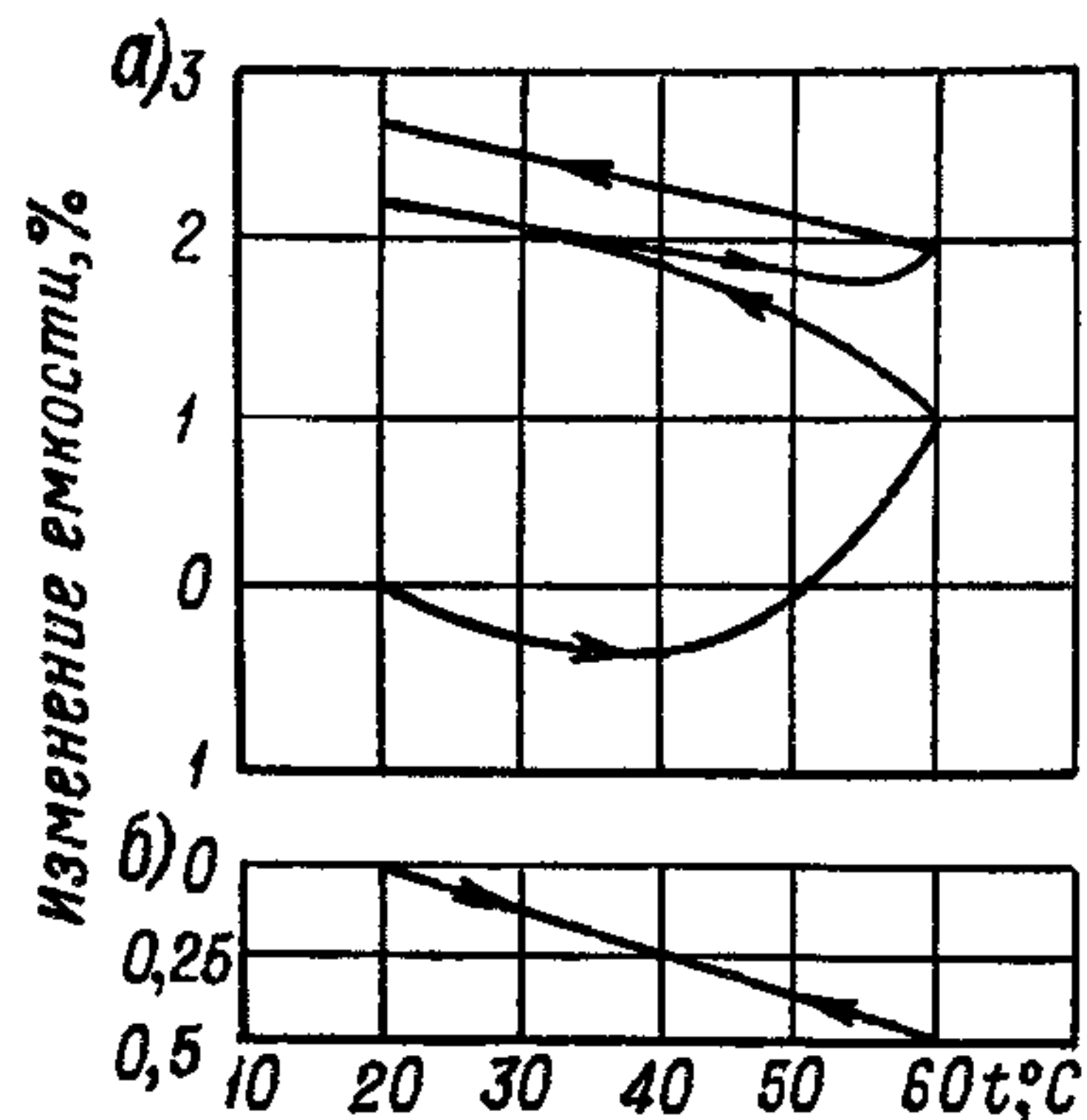


Рис. 246. Зависимость емкости полистирольного конденсатора от температуры при двух циклах нагрева и охлаждения: а — незапеченный конденсатор; б — запеченный.

лее разделяется на две ленты, наматываемые в отдельные рулоны. Нижний предел толщины полиэтиленовой пленки составлял ранее $25\text{--}30\text{ мкм}$, что являлось одной из причин, ограничивающих ее применение в конденсаторах, хотя по нагревостойкости она превосходит полистирольную (в конденсаторах до $85\text{--}90^{\circ}\text{C}$) и стоит дешевле. Путем радиационной обработки (облучения) можно повысить нагревостойкость полиэтиленовой пленки на $20\text{--}30^{\circ}\text{C}$, улучшение технологии получения пленки позволяет снизить ее толщину до $10\text{--}15\text{ мкм}$, что будет способствовать расширению ее применения. Вместе с тем, по электрическим свойствам полиэтилен несколько уступает полистиролу (табл. 23), основным его недостатком является резко повышенный ТКЕ (примерно в три раза больше, чем для полистирола). Таким образом, полиэтиленовую пленку можно применять взамен полистирольной тогда, когда надо несколько улучшить рабочий интервал температур, а некоторое ухудшение электрических свойств конденсаторов по сравнению с полистирольными является допустимым.

Полипропилен, как и полиэтилен, относящийся к классу полиолефинов, представляет собой новый материал, впервые полученный в Италии, где полипропиленовая пленка выпускается под названием моплефан; в ФРГ выпуск такой пленки начат под названием хостален. Эта пленка похожа на полиэтиленовую, но имеет более высокую нагревостойкость; по-видимому, она будет дешевле полиэтиленовой.

Поли тетра фтор эти лен (фторопласт-4 в СССР, тефлон — в США) представляет собой уже не углеводород, как рассмотренные выше три материала, а фтористоуглеродное соединение с большой энергией связи между атомами С и F (107 ккал/моль); это объясняет высокую нагревостойкость материала и его химическую устойчивость (если не считать малой стойкости к короне). Основной метод получения пленки из этого материала состоит в следующем: из порошка ПТФЭ прессуют при нормальной температуре заготовку в виде цилиндра; после нагрева при 370°C в течение нескольких часов заготовка спекается в сплошное тело; заготовку ставят на станок и резцом срезают с нее стружку в виде непрерывной толстой пленки; путем вальцевания толщину пленки снижают до требуемых малых значений, причем осуществляется и ориентация пленки. Нижний предел толщины для пленки ПТФЭ до $5\text{—}6 \text{ мкм}$; однако для таких тонких пленок характерна большая дырчатость и малая электрическая прочность, даже при их использовании в $2\text{—}3$ слоя. Поэтому чаще применяют пленки толщиной $10\text{—}20 \text{ мкм}$. По углу потерь и коэффициенту абсорбции пленка ПТФЭ лучше полистирольной, не говоря уже о рабочей температуре (обычно до 200°C , а при снижении напряжения — до 250°C), по стабильности емкости пленка ПТФЭ несколько уступает полистирольной. Широкое применение этой пленки ограничивается ее высокой стоимостью. Надо указать, что в США был разработан иной способ получения такой пленки: осаждением из эмульсии на фольгу с последующим прогревом для спекания в сплошной слой. Нанося несколько слоев, можно было получить резкое улучшение $E_{\text{пр}}$, причем пленку можно было использовать прямо на фольге, оставшейся в виде обкладки, или снимать с фольги и применять в виде свободной пленки. Однако эта пленка является неориентированной и намотанные секции нельзя запечь для стабилизации емкости, что затрудняет широкое применение такой пленки.

Ранее считалось, что в отличие от других пленочных материалов пленка ПТФЭ принципиально не допускает металлизации, так как адгезия ПТФЭ к металлам очень мала. Были разработаны методы химической обработки поверхности ПТФЭ, увеличивающие его адгезионную способность, но они сложны, опасны (используется металлический натрий или его недостаточно устойчивые соединения) и дают ухудшение электрических свойств пленки. Недавно показано, что после специальной электрофизической обработки поверхности пленки ПТФЭ можно подвергать ее далее

металлизации обычным методом испарения металлов в вакууме (§ 22), сохраняя при этом высокие электрические свойства.

Т е ф л о н ГЕР, представляющий собой сополимер тетрафторэтилена и гексафторэтилена (аналоги этилена и пропилена, но с заменой Н на F), применяется в виде пленки в конденсаторостроении США. Он весьма близок к обычному тефлону (ПТФЭ), но имеет несколько сниженную нагревостойкость; зато он легко ме-

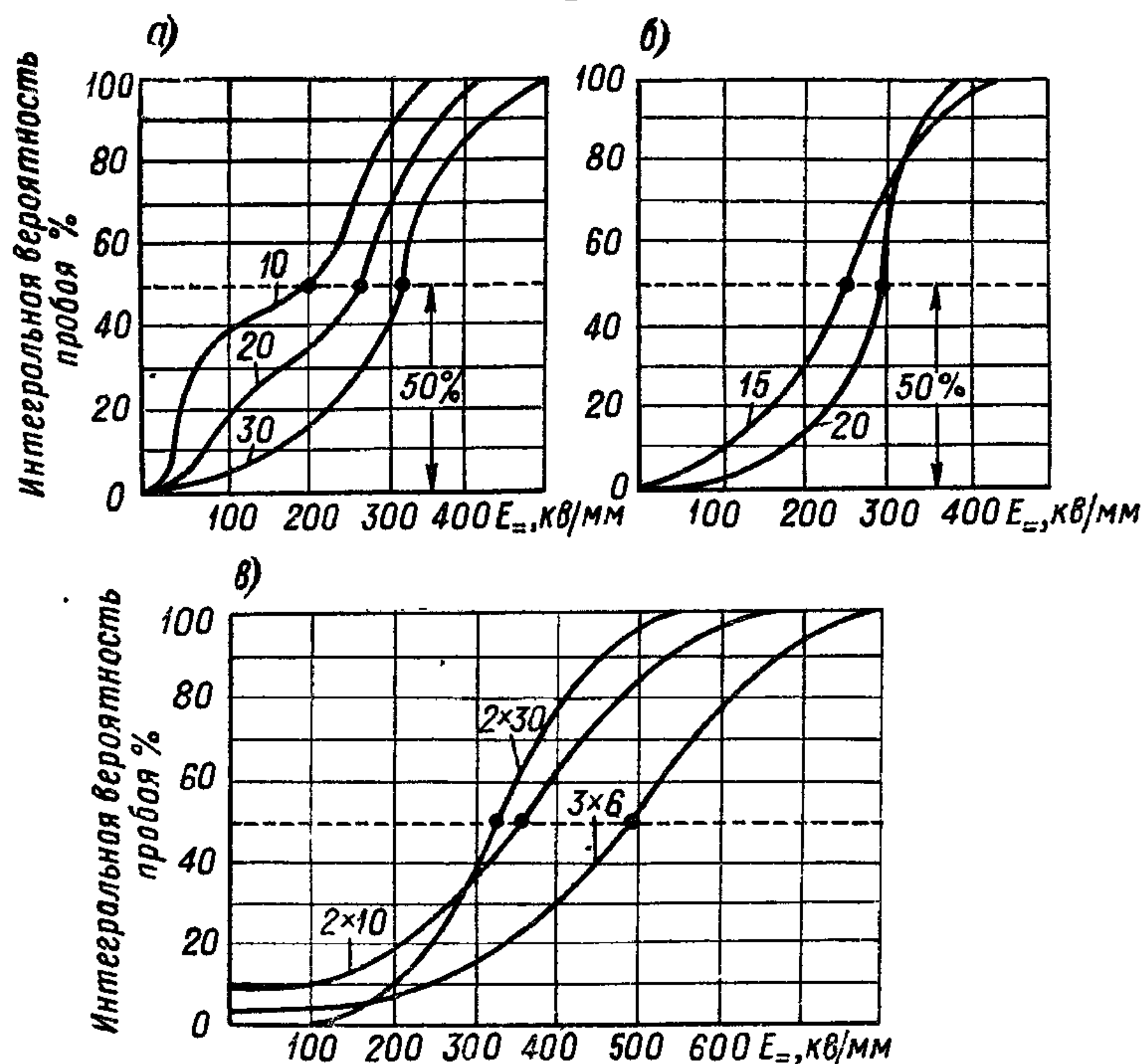


Рис. 247. Разброс электрической прочности неполярных пленок при постоянном напряжении (кратковременное воздействие, электроды малой площади): а — полистирол, б — полиэтилен, в — политетрафторэтилен; цифры у кривых — толщина пленки в микронах (для полистирола и полиэтилена — испытание в один слой; для ПТФЭ — в 2 и 3 слоя).

таллизируется и обладает некоторыми дополнительными технологическими преимуществами.

П о л и п а р а к с и л и л е н (парилен) получается термическим разложением паров параксилола $\text{CH}_3-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_3$ при высокой температуре в виде пленки, осаждающейся на поверхности фольги, проходящей через печь, в которой идет процесс пиролиза параксилола. Ранее эту пленку использовали только вместе с фольгой, на которую она нанесена в производстве тонкослойных конденсаторов (§ 85); теперь, по-видимому, разработана методика получения и свободных пленок из этого материала. По нагревостойкости он приближается к фторированным диэлектрикам, но, вероятно, будет значительно дешевле.

Полифениленоксид (ПФО, нирон, норил) представляет собой новый неполярный полимер, использованный в США для изготовления «синтаровых» конденсаторов, иначе называемых «конденсаторами из синтетической смолы». Уступает полистиролу по величине угла потерь и $\rho_{об}$, но превосходит его по нагревостойкости и стабильности ϵ .

Кратковременная электрическая прочность синтетических неполярных пленок достаточно велика: средние значения $E_{пр}$ при постоянном напряжении составляют 200—300 кВ/мм при испытании в один слой, при испытании в два слоя $E_{пр}$ превышает 300 кВ/мм (рис. 247). При переменном напряжении значения $E_{пр}$ в 1,5—2 раза ниже. Вместе с тем наблюдается большой разброс получаемых значений, особенно при малых толщинах пленки, приводящий иногда к точкам нулевой прочности даже при испытании в 2—3 слоя. Поэтому для пленочных конденсаторов с большой площадью обкладок значения $E_{пр}$ могут быть значительно ниже, чем указанные здесь средние величины, полученные при испытании образцов пленок с электродами малой площади.

За отдельными исключениями неполярные пленки имеют увеличенную толщину по сравнению с бумагой, а ϵ у них заметно снижена; поэтому удельные характеристики пленочных конденсаторов этого типа резко ухудшены по сравнению с бумажными и металлобумажными конденсаторами (за исключением тех случаев, когда объем конденсатора определяется не электрической прочностью, а выделяемым теплом, как для силовых конденсаторов для частоты 1—10 кГц).

По электрическим характеристикам пленочные конденсаторы данного типа в большей степени следует сравнивать со слюдяными или высокочастотными керамическими, которые пленочные конденсаторы превосходят по верхнему пределу номинальной емкости, постоянной времени и коэффициенту абсорбции, уступая им по величине ϵ , стабильности емкости и обладая углом потерь того же порядка.

В последние годы много внимания было уделено получению полярных синтетических пленок с повышенной величиной ϵ и углом потерь, близким к углу потерь пропитанной бумаги. Надо отметить, что если у неполярных пленок угол потерь практически не зависит от частоты, то для полярных пленок, в соответствии с природой их поляризации, $\operatorname{tg} \delta$ резко возрастает с частотой, проходя через максимум при некотором ее значении (рис. 248). Некоторые сведения о материалах, используемых для получения полярных пленок, даны в табл. 24.

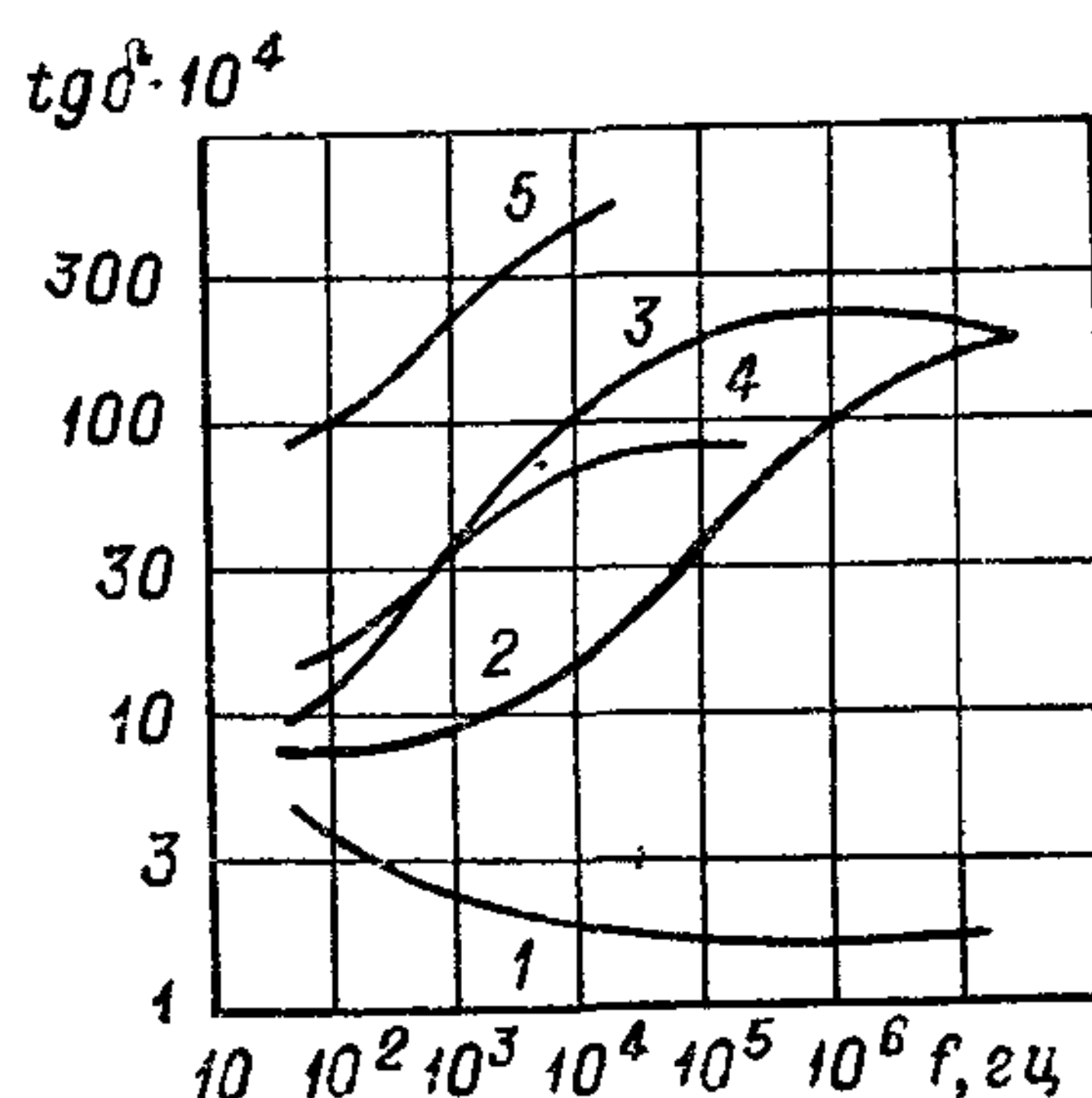


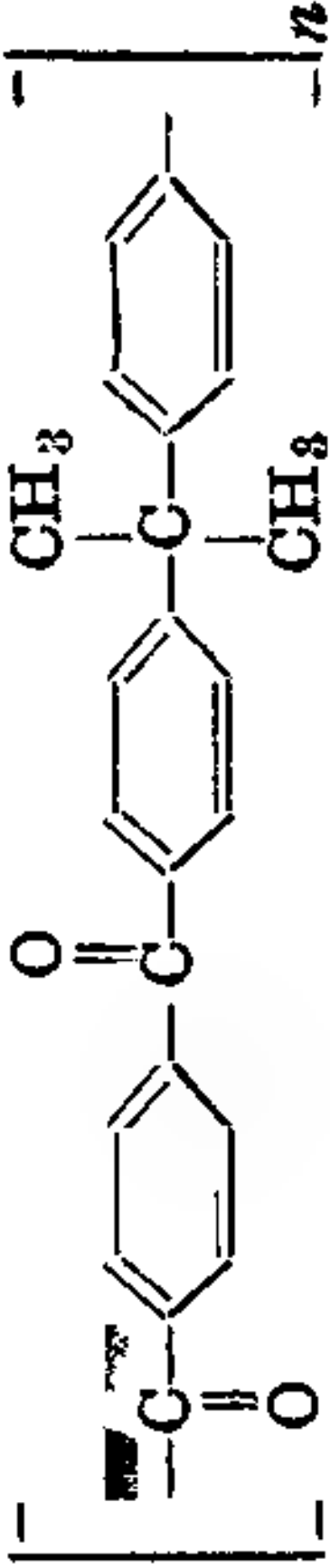
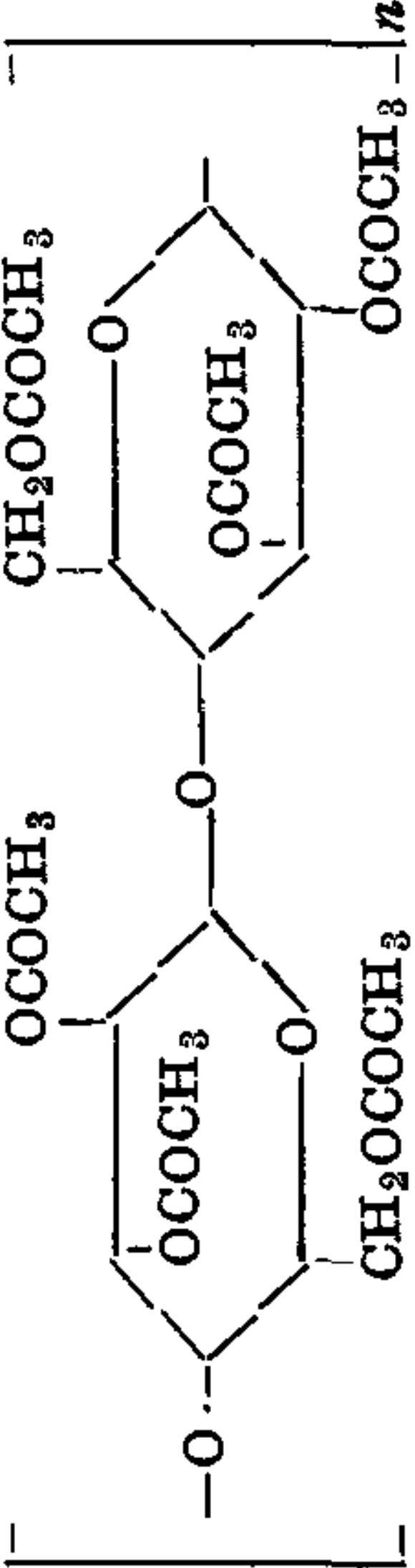
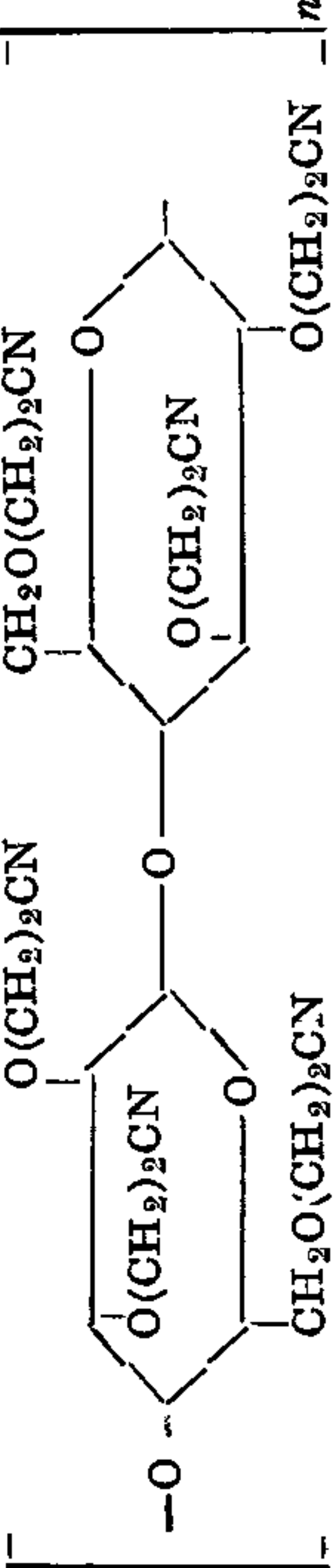
Рис. 248. Зависимость угла потерь синтетических пленок от частоты при 20° С.

1 — неполярная пленка (полистирол); 2 — 5 — полярные пленки (2 — ПК, 3 — ПЭТФ, 4 — каптан, 5 — ТАЦ).

Материалы, применяемые для изготовления полярных пленок

Название материала и обозначение	Химическая формула	$\gamma, \text{ г/см}^3$	$\sigma_p, \text{ кг/см}^2$	$t_{\text{макс}}, ^\circ\text{C}$	ε (1 кГц, 20° C)	$\text{tg } \delta \times 10^4$ (1 кГц, 20° C)	$\rho_{00}, \text{ ом} \cdot \text{см}$ (20° C)
Полиэтилентере- фталат (ПЭТФ)		1,4	1600—2000	125	3,2	40—50	1018
Полициклогексан- диметилентере- фталат (Т16)		1,22	1000—1500	140	3,1	40—50	1018
Поликарбонат (ПК)		1,2—1,24	600—700	140	3,0	8—12	5 · 1018
Полипиромелити- мид (H-film)		1,42	1200—1500	200—250	3,0—3,5	20—30	5 · 1018

Продолжение табл. 24

Название материала и обозначение	Химическая формула	$\gamma, \text{ г/см}^3$	$\sigma_p, \text{ кг/см}^2$	$t_{\text{макс}}, ^\circ\text{C}$	$\epsilon (1 \text{ кгц}, 20^\circ\text{C})$	$\text{tg } \delta \times 10^4 (1 \text{ кгц}, 20^\circ\text{C})$	$\rho_{06}, \text{ ом} \cdot \text{см} (20^\circ\text{C})$
Полиарилат (ПА)		—	500—900	150—175	3,0—3,5	40—50	1017
Триацетат целлюлозы (ТАЦ)		1,2	900—1200	80—100	3,5—3,7	50—70	$5 \cdot 10^{16}$
Цианэтилцеллюлоза (ЦЭЦ)		1,2	350—400	65	10—15	100—250	1010

Полиэтилентерефталатная пленка (ПЭТФ) является сейчас наиболее широко применяемой в конденсаторостроении полярной пленкой. ПЭТФ впервые был изучен в Англии, где из него изготавливается пленка мелинекс, но еще до выпуска этой пленки в США появилась пленка майлар, в СССР начато производство пленки ПЭТФ под названием лавсан, в ФРГ она называется хостафан в Японии — люмиррор, в Италии — монтивель и т. д. Особенностью пленки является высокая механическая прочность, превышающая прочность бумаги, при удлинении порядка 50—150%. Поэтому нижний предел толщины этой пленки может быть ниже, чем для бумаги. Действительно, очень быстро была освоена пленка с толщиной 6 мкм, а сейчас в США уже выпускается пленка толщиной 3,8 мкм. Электрическая прочность пленки также высокая и достигает при электродах малой площади 350—400 кВ/мм (пост. ток). Поэтому, хотя ε пленки ниже, чем у пропиточной бумаги, удельные характеристики могут быть получены лучшими, чем у бумажных конденсаторов. У нас эта пленка еще относительно дорога, но в США ее цена снижена настолько, что с учетом меньшего расхода пленки на конденсатор по сравнению с бумагой стоимо-

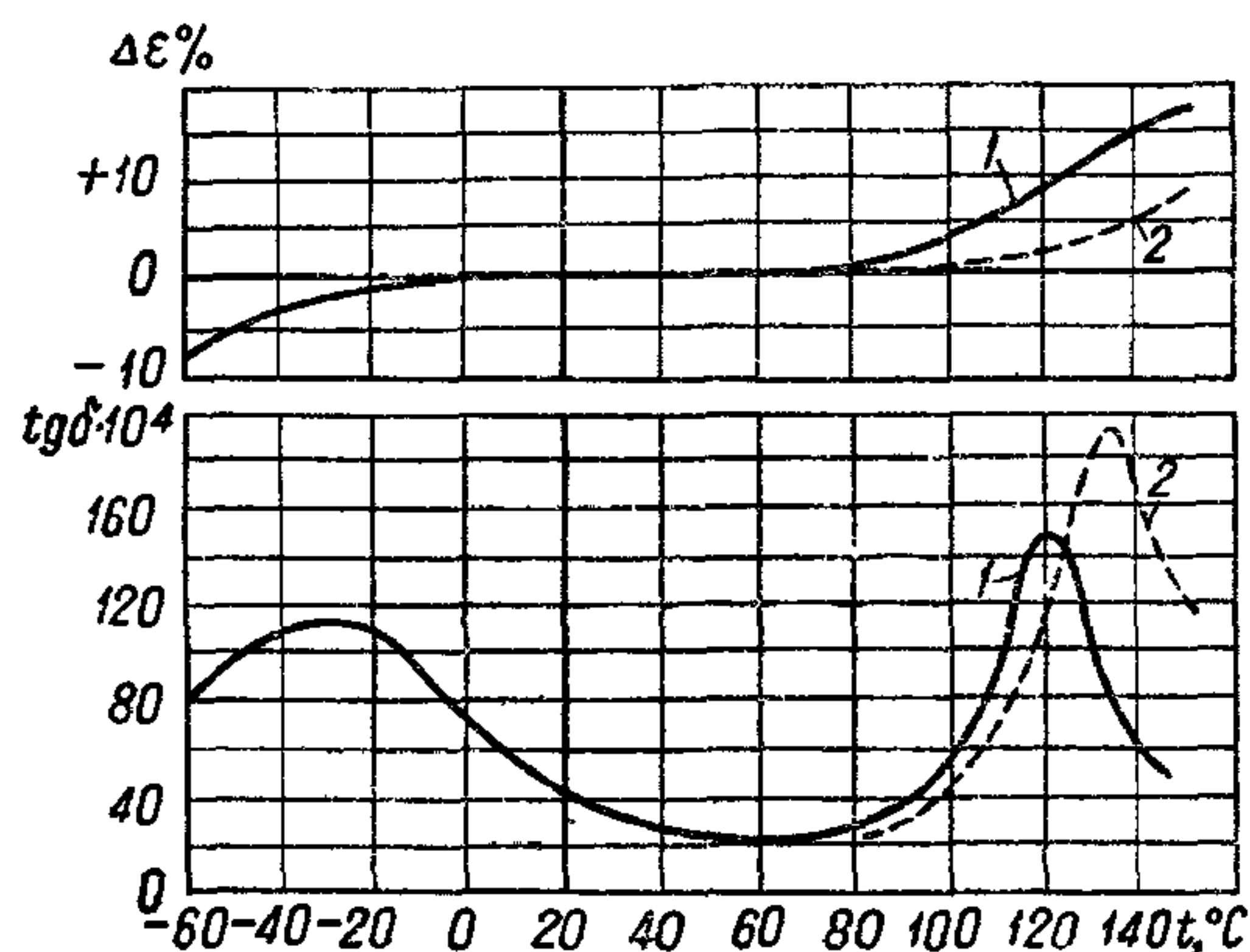


Рис. 249. Зависимость ϵ и угла потерь полиэфирных пленок от температуры при частоте 1 кГц.

1 — полиэтилентерефталат (майлар); 2 — полициклогександиметилтерефталат (Т16).

мость бумажного и майларового конденсаторов примерно одинакова (рис. 143, з). В отличие от бумаги пленка не содержит токопроводящих включений, а потому может применяться в один слой с обкладками из фольги. Пленка также легко поддается металлизации. Угол потерь пленки близок к углу потерь бумаги, удельное сопротивление — выше. Для бумажных конденсаторов постоянного напряжения, применяемых в электронной технике, полиэтилентерефталатные конденсаторы являются уже опасными конкурентами, тем более, что верхний предел рабочей температуры для них повышен.

ПЭТФ представляет собой полиэфир, полученный при взаимодействии терефталевой кислоты с этиленгликолем, поэтому изготовленную из него пленку иногда называют также полиэфирной пленкой. Для получения пленки сначала отливается из расплава ПЭТФ толстая пленка-заготовка, которая потом в нагретом виде растягивается до получения требуемой толщины; при этом происходит и ориентация пленки. Температурная зависи-

мость электрических свойств пленки ПЭТФ показана на рис. 249. (Наличие двух максимумов дано объяснение в § 27; см. рис. 56, в).

В США получен и другой полиэфир, близкий по составу к ПЭТФ, но отличающийся от него улучшенной нагревостойкостью и большей устойчивостью к гидролитическому разрушению при старении. Это — полициклогександиметилтерефталат. Пленка из этого материала получила в США обозначение Т-16. По электрическим свойствам этот материал близок к пленке майлар, но высокотемпературный максимум угла потерь и начало резкого роста ϵ сдвинуты в область более высоких температур.

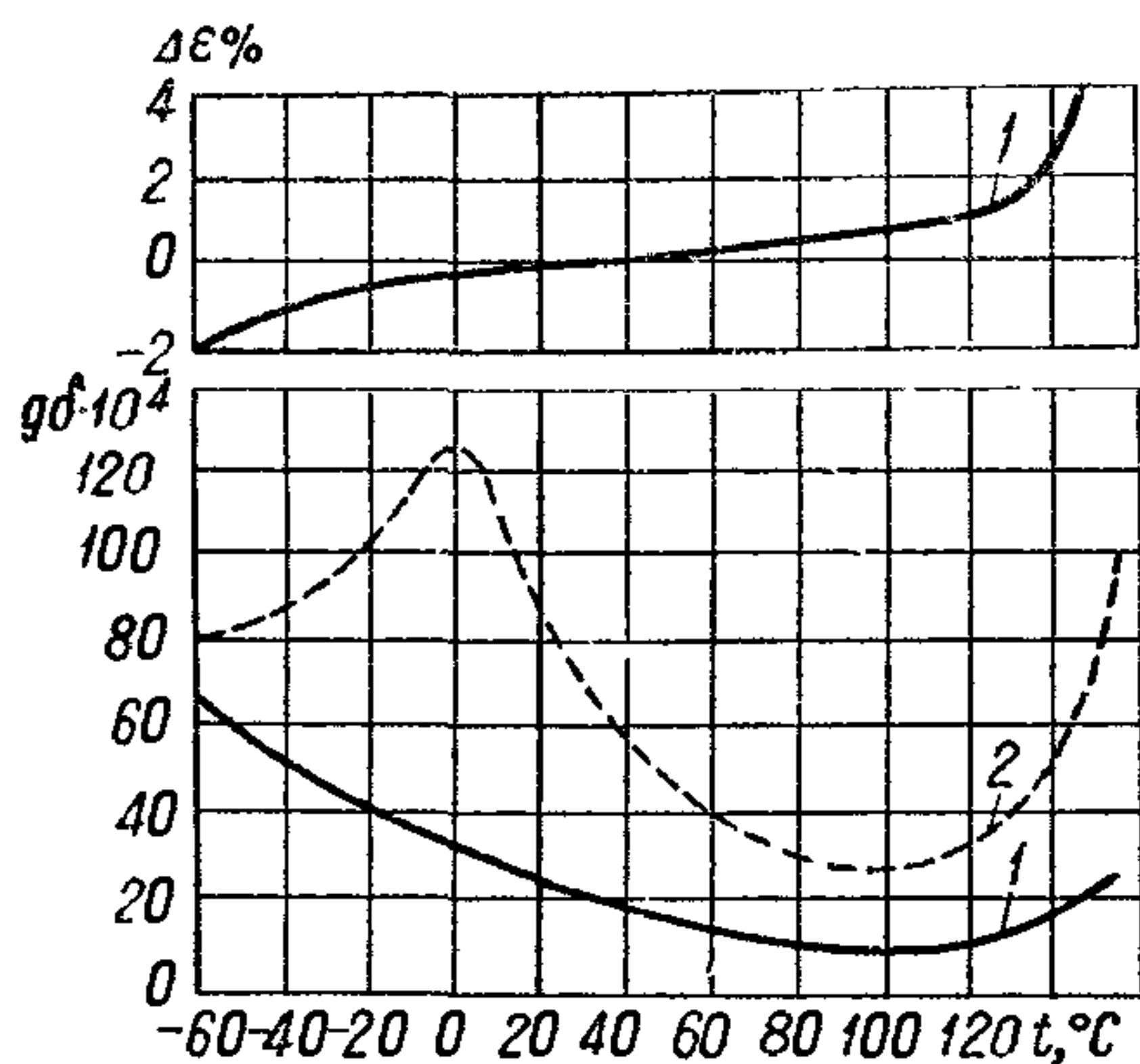


Рис. 250. Зависимость ϵ и угла потерь поликарбонатной пленки от температуры.

1 — при частоте 1 кГц; 2 — при 300 кГц.

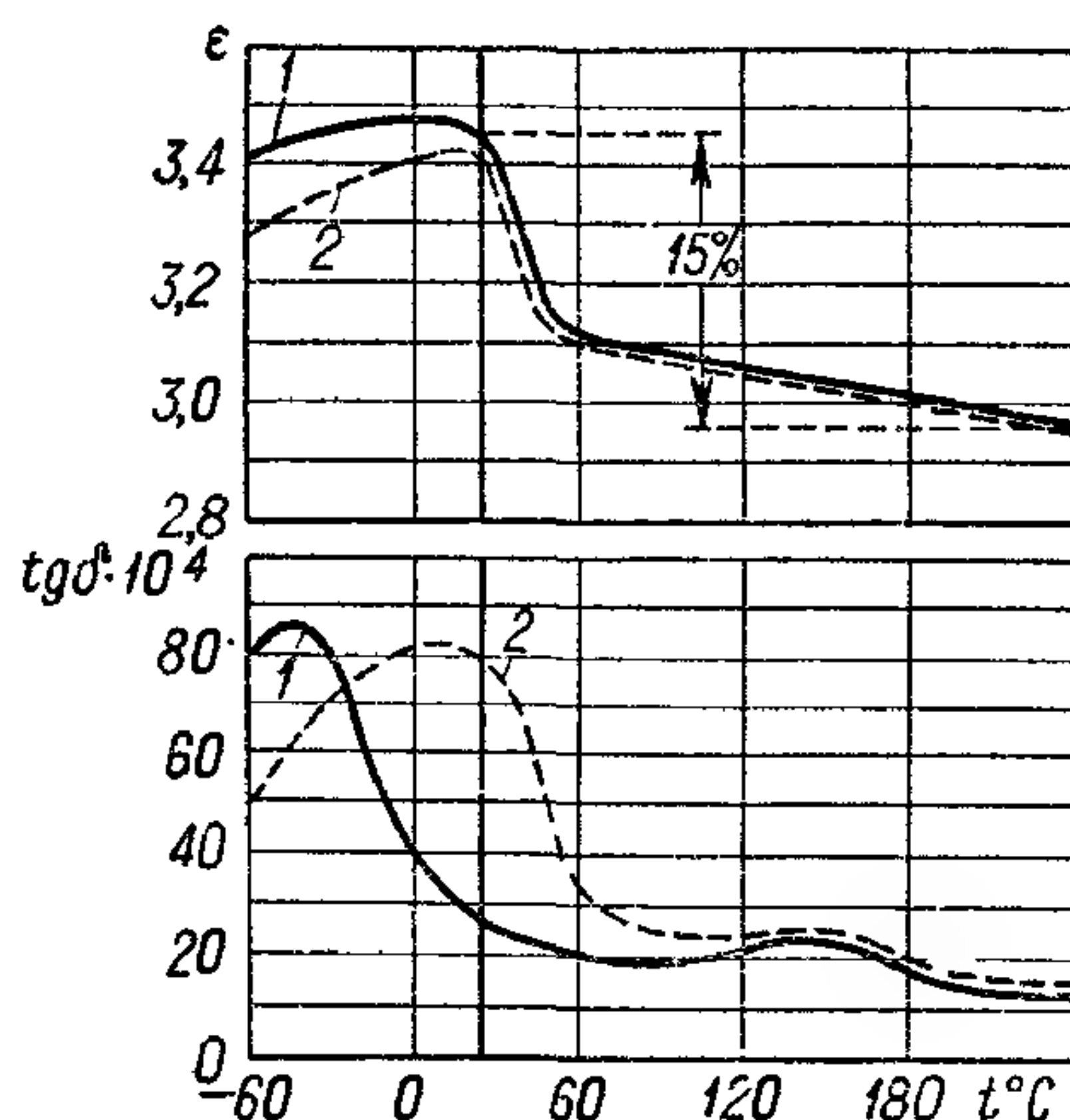


Рис. 251. Зависимость ϵ и угла потерь пленки из полидиметилсилоксана (каптана) от температуры.

1 — при частоте 1 кГц; 2 — при 100 кГц.

Еще более новым материалом является п о л и к а р б о н а т, представляющий собой полиэфир на основе угольной кислоты. Пленка из этого материала впервые начала выпускаться в ФРГ под названием макрофоль. По нагревостойкости она близка к пленке ПЭТФ, но отличается сниженными потерями (рис. 250) и более высоким удельным сопротивлением. В этом отношении поликарбонатная пленка занимает среднее положение между пленкой ПЭТФ и полистирольной. Преимуществом этой пленки, обеспечившей ей применение в современном конденсаторном производстве, является возможность получать из нее конденсаторы с малым ТКЕ, меньшим чем у полистирольных и близким к слюдяным. Пленка из поликарбоната получается отливкой заготовки из раствора с последующей вытяжкой для ориентации и снижения толщины. При использовании в лакопленочных конденсаторах (§ 85) толщина пленки может быть получена до 2 мкм. Обычная рулонная пленка имеет толщину порядка 10 мкм.¹

¹ По последним данным, фирма Байер (ФРГ) освоила выпуск свободной пленки толщиной 2 мкм в рулонах.

Полипиромеллитимид (рис. 251) представляет собой новое нагревостойкое высокомолекулярное соединение, полученное в США и представляющее значительный интерес для электроизоляционной техники, в том числе и для конденсаторостроения, несмотря на высокую стоимость. Пленка из этого материала сначала получила название Н-film, но теперь называется каптон. Пока нижний предел толщины этой пленки указан равным 12,5 мкм. При нормальной температуре механическая прочность пленки несколько ниже, чем пленки ПЭТФ, но зато ее прочность мало зависит от температуры, а эластичность сохраняется в пределах температуры $\pm 200^\circ \text{C}$. Эта пленка по нагревостойкости приближается к фторопластовой, имеет несколько большую ϵ , но величина потерь ее больше и удельное сопротивление ниже. При толщине 25 мкм и 20°C $E_{\text{пр}} = 280 \text{ кВ/мм}$, а при $+200^\circ \text{C}$ — 240 кВ/мм.

Полиарилат представляет собой продукт, разработанный в СССР, и может быть получен в нескольких вариантах химического состава. Пленка из полиарилата по нагревостойкости и свойствам занимает промежуточное положение между полиэтилентерефталатной и полипиромеллитимидной. Можно ожидать, что пленка этого типа будет доведена до промышленного производства в ближайшее время.

Как видно из табл. 24, все соединения, позволяющие получать пленки с высокой нагревостойкостью, характеризуются большим количеством бензольных колец в составе молекулы.

Эфиры целлюлозы представляют собой продукты, полученные при взаимодействии целлюлозы (клетчатки) с кислотами и спиртами; возможность проведения реакции этерификации целлюлозы связана с наличием в ее молекуле большого числа гидроксильных групп, придающих целлюлозе в ходе этой реакции свойства спирта. В отличие от целлюлозы ее эфиры плавки и легко растворимы в ряде органических растворителей. Пленки из эфиров целлюлозы получают отливкой из раствора. Триацетатная пленка (рис. 252) с толщиной порядка 100 мкм получила применение в электромашиностроении. Нижний предел толщины, достигнутый при обычной технологии, составляет 12—15 мкм; при такой толщине триацетатная пленка нашла ограниченное применение в конденсаторостроении США. В настоящее время интерес к пленке ТАЦ возрос в связи с ее использованием в лакопленочных конденсаторах при толщине порядка 3 мкм.

Анализируя данные табл. 23, можно увидеть, что все перечисленные выше полярные пленки имеют относительно небольшую ϵ , порядка 3—3,5, т. е. относительно мало превосходят в этом отношении неполярные пленки и заметно уступают пропитанной бумаге ($\epsilon \approx 4 \div 6$). Недавно была показана возможность резко повысить ϵ полярной органической пленки на примере пленки из нового

эфира целлюлозы — цианэтилцеллюлозы. В зависимости от степени замещения гидроксильных (моно-, ди- или трицианат) полярной группой — $\text{CH}_2\text{—CH}_2\text{—CN}$ можно иметь ϵ в пределах от 10 до 15. У этой пленки ϵ резко зависит от температуры и частоты (рис. 253) и $\text{tg } \delta$ заметно повышен, но главным ее недостатком является низкое удельное сопротивление, не позволяющее получать достаточно высоких значений постоянной времени конденсаторов даже при умеренных температурах. Это ограничивает возможность применения конденсаторов из этой пленки при постоянном токе, а большой $\text{tg } \delta$ не позволяет применить их при

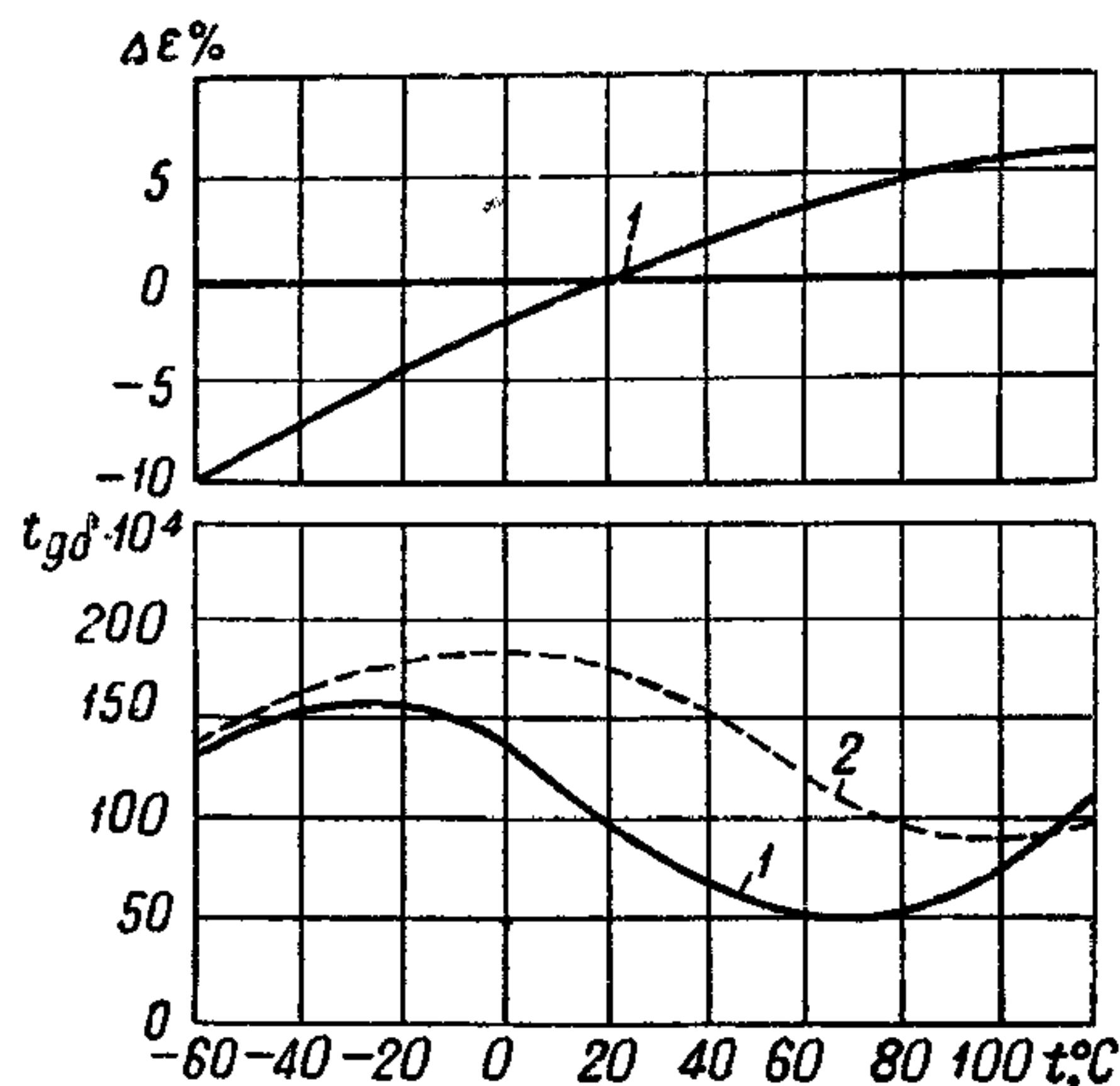


Рис. 252. Зависимость ϵ и угла потерь триацетатной пленки (пластикон А) от температуры.

1 — при частоте 60 гц; 2 — при 1 кгц.

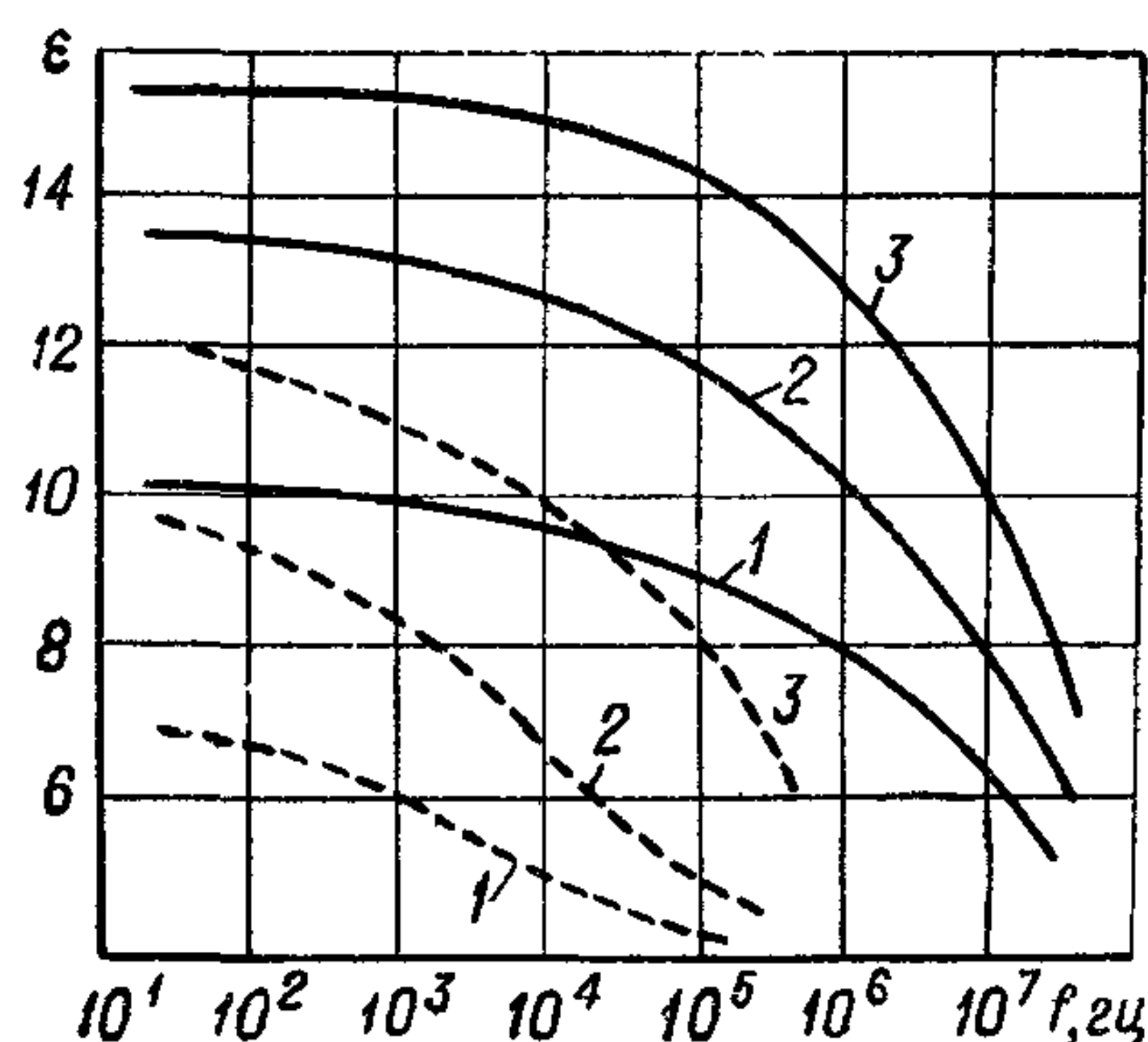


Рис. 253. Зависимость ϵ от частоты для цианэтилированной целлюлозы при $+20^\circ \text{C}$ (сплошные кривые) и при -53°C (прерывистые).

1 — моноцианэтилцеллюлоза; 2 — дицианэтилцеллюлоза; 3 — трицианэтилцеллюлоза.

повышенных частотах. Поэтому перспективы применения этой пленки в конденсаторостроении, несмотря на высокую ϵ , следует считать ограниченными.

Мы уже упоминали, что синтетические пленки в сравнении с бумагой имеют резко сниженный коэффициент абсорбции (§ 14). Для таких неполярных пленок, как полистирольная и ПТФЭ, можно получать значения $k_a \approx 0,01 \div 0,1\%$, для пленок ПЭТФ и ПК — порядка $0,2\text{—}0,3\%$, для пленок из эфиров целлюлозы величина k_a повышена и приближается к значениям, характерным для бумаги.

Особенностью синтетических пленок является также резко сниженная гигроскопичность. Для пропитанной бумаги гигроскопичность при выдержке во влажном воздухе достигает до $5\text{—}6\%$, причем уже содержание влаги порядка $0,1\%$ и выше заметно ухудшает электрические свойства. Поэтому приходится уделять большое внимание вопросу сушки и герметизации бумажных конденсаторов. Гигроскопичность синтетических пленок при

длительной выдержке в воде характеризуется следующими цифрами (в %):

Политетрафторэтилен	0,01
Полистирол	0,07
Полипропилен	0,3
Поликарбонат	0,3
Полиэтилентерефталат	0,6
Ацетобутират	2,0
Триацетат	2,5

В связи с малой гигроскопичностью во многих случаях применения можно использовать незащищенные секции пленочных конденсаторов, после их запекания, обеспечивающего уплотнение витков на торцах секций (рис. 254); применение уплотненных конструкций (металлический или пластмассовый корпус, заливка торцов

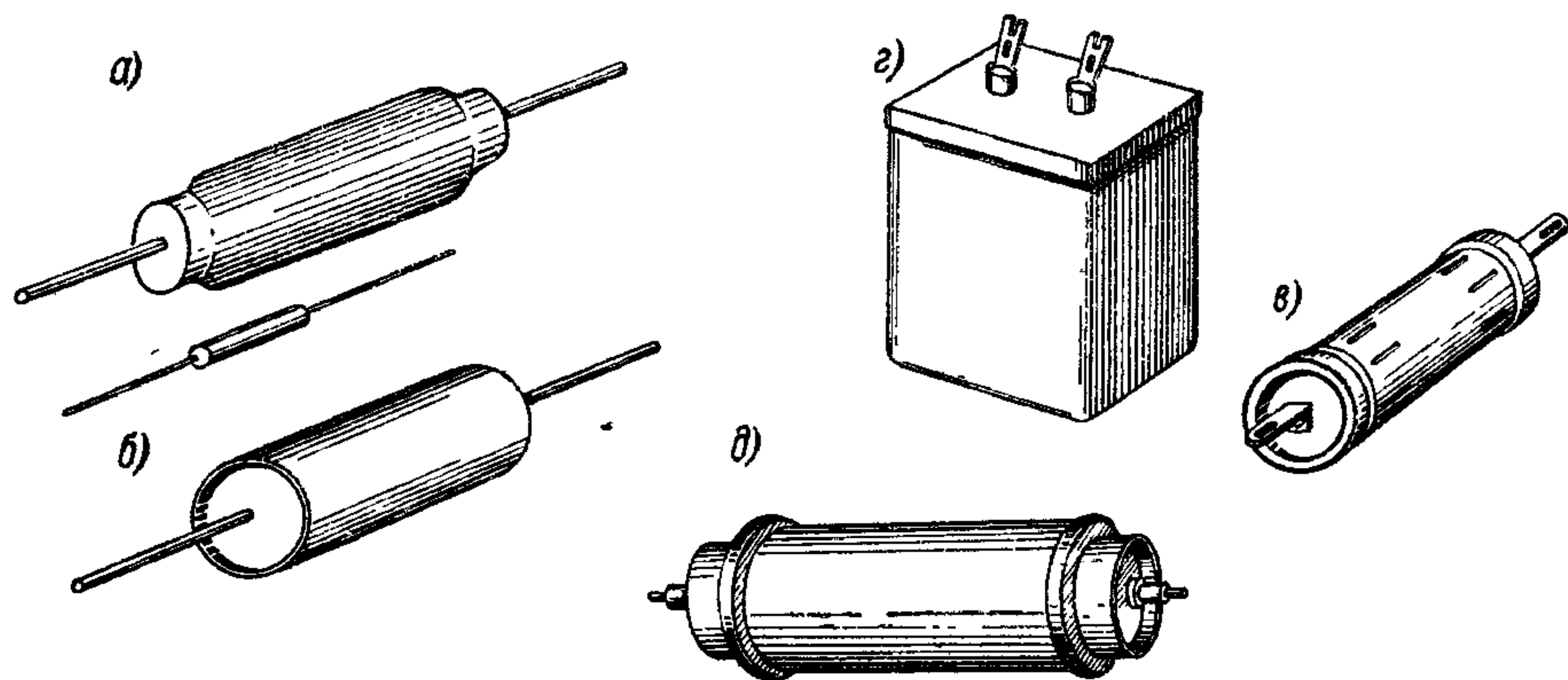


Рис. 254. Пленочные конденсаторы: а — открытого типа, полистирольный; б — уплотненного типа, лавсановый (открытый торец корпуса залит эпоксидной смолой); в — уплотненного типа из пленки ПТФЭ (торцовые шайбы из фторопласта, отверстия в корпусе для предупреждения конденсации влаги); г — герметизированный низковольтный полистирольный (с керамическими изоляторами); д — герметизированный из пленки ПТФЭ высоковольтный (керамический корпус, наполнение сжатым газом).

эпоксидной смолой) обеспечивает достаточную влагустойчивость пленочных конденсаторов даже в относительно тяжелых условиях работы, кроме конденсаторов из пленок эфиров целлюлозы, которые обычно, как и бумажные конденсаторы, требуют герметизации. Пленочные конденсаторы, от которых требуется особо стабильная емкость или особо высокая постоянная времени, все же приходится герметизировать, чтобы исключить возможное небольшое влияние влаги на электрические характеристики. Герметизация требуется также при высоких рабочих температурах, чтобы исключить контакт пленки с кислородом воздуха и предупредить возможность окислительного старения. Малая гигроскопичность синтетических пленок облегчает и ускоряет процесс их сушки в сравнении с бумажными конденсаторами.

Пленочные конденсаторы высокого напряжения нуждаются в пропитке жидким диэлектриком для замены воздуха между витками пленки и фольги и связанного с этим повышения электрической прочности. Остаточный воздух в случае пленочного диэлектрика очень опасен, так как большинство синтетических пленок, особенно ПТФЭ, обладают пониженной короностойкостью. Однако пропитка пленочных конденсаторов затрудняется тем, что большинство пленок плохо смачивается пропитывающими жидкостями, оставляя «воздушные мешки» — очаги развития ионизации. Поэтому чисто пленочные конденсаторы применяют только при небольших напряжениях (обычно до 1000—1500 в пост. тока), при высоких напряжениях используют комбинированный пленочнобумажный диэлектрик, в котором бумажные прослойки играют роль фитиля, втягивающего пропитывающую жидкость в зазоры между слоями пленки. Как исключение только конденсаторы малой емкости (300—500 пф) с напряжением 15—16 кВ изготавливают иногда в чисто пленочном исполнении и без пропитки. Подбирая специальную пропиточную массу и режим пропитки, можно пропитывать и чисто пленочные конденсаторы (см. сноску на стр. 409).

§ 83. Конденсаторы с диэлектриком из неполярных синтетических пленок

Полистирольные конденсаторы. Как уже отмечалось выше, полистирольная пленка явилась первой из неполярных пленок, нашедших себе широкое применение в конденсаторостроении, несмотря на относительно небольшую нагревостойкость. Полистирольные конденсаторы открытого типа небольшой емкости находят себе применение в радиоприемной и телевизионной аппаратуре общего назначения; герметизированные полистирольные конденсаторы с повышенной точностью и стабильностью емкости и с высокой постоянной времени применяются в электроизмерительной технике и в счетно-решающих устройствах. Обычная норма на величину $\operatorname{tg} \delta$ не выше $10 \cdot 10^{-4}$ такая же, как для слюдяных конденсаторов, однако, поскольку полистирольные конденсаторы часто имеют более высокие значения номинальной емкости, в области высоких частот угол потерь может заметно возрасти за счет влияния потерь в обкладках; намотка с выступающей фольгой дает возможность в этом случае заметно снизить $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора, так как потери в диэлектрике в области повышенных частот меньше потерь в обкладках (рис. 255). То же явление мы наблюдаем и для всех других типов конденсаторов из неполярных пленок — фторопластовых, полиэтиленовых и т. д.

Зависимость емкости от температуры для запеченных полистирольных конденсаторов близка к линейной (рис. 256), обычная норма на величину ТКЕ — не более $200 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, фактические значения составляют $(100—150) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Стабильность емко-

сти во времени для правильно запеченных и герметизированных полистирольных конденсаторов велика, колебания емкости обычно не превосходят $\pm (0,1-0,2)\%$, некоторые фирмы указывают даже

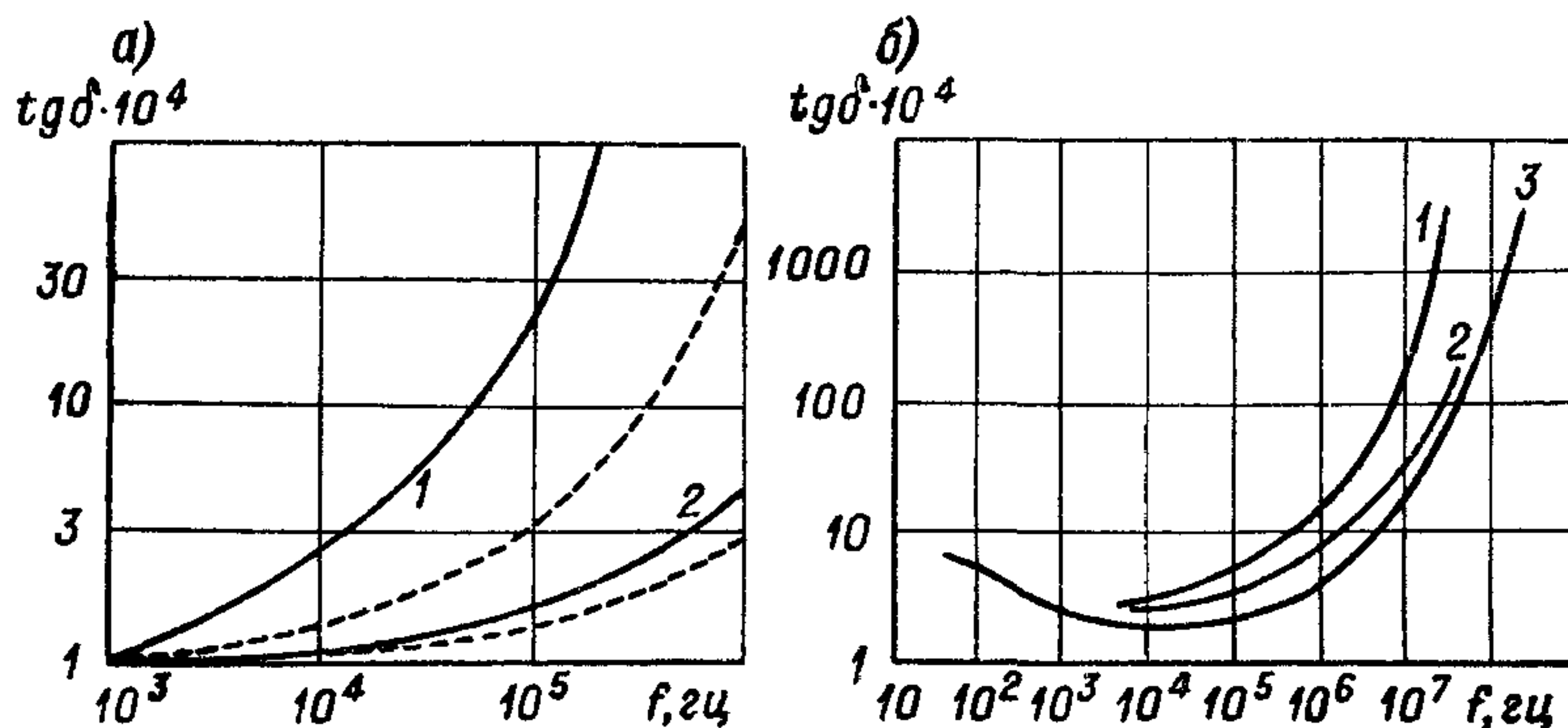


Рис. 255. Зависимость угла потерь пленочных конденсаторов с неполярным диэлектриком от частоты: а — полистирольные конденсаторы низкого напряжения.

1 — намотка со скрытой фольгой; 2 — намотка с выступающей фольгой (сплошные кривые — емкость 0,1 мкф, пунктирные — 0,01 мкф);

б — высоковольтные конденсаторы.

1 — полиэтиленовый 2000 пф, 20 кВ; 2 — полиэтиленовый 250 пф, 3,5 кВ; 3 — тефлоновый 24 кВ небольшой емкости.

цифру $\pm 0,05\%$. Такая высокая стабильность емкости делает целесообразным изготавливать полистирольные конденсаторы с повышенной точностью емкости, т. е. с уменьшенным допуском;

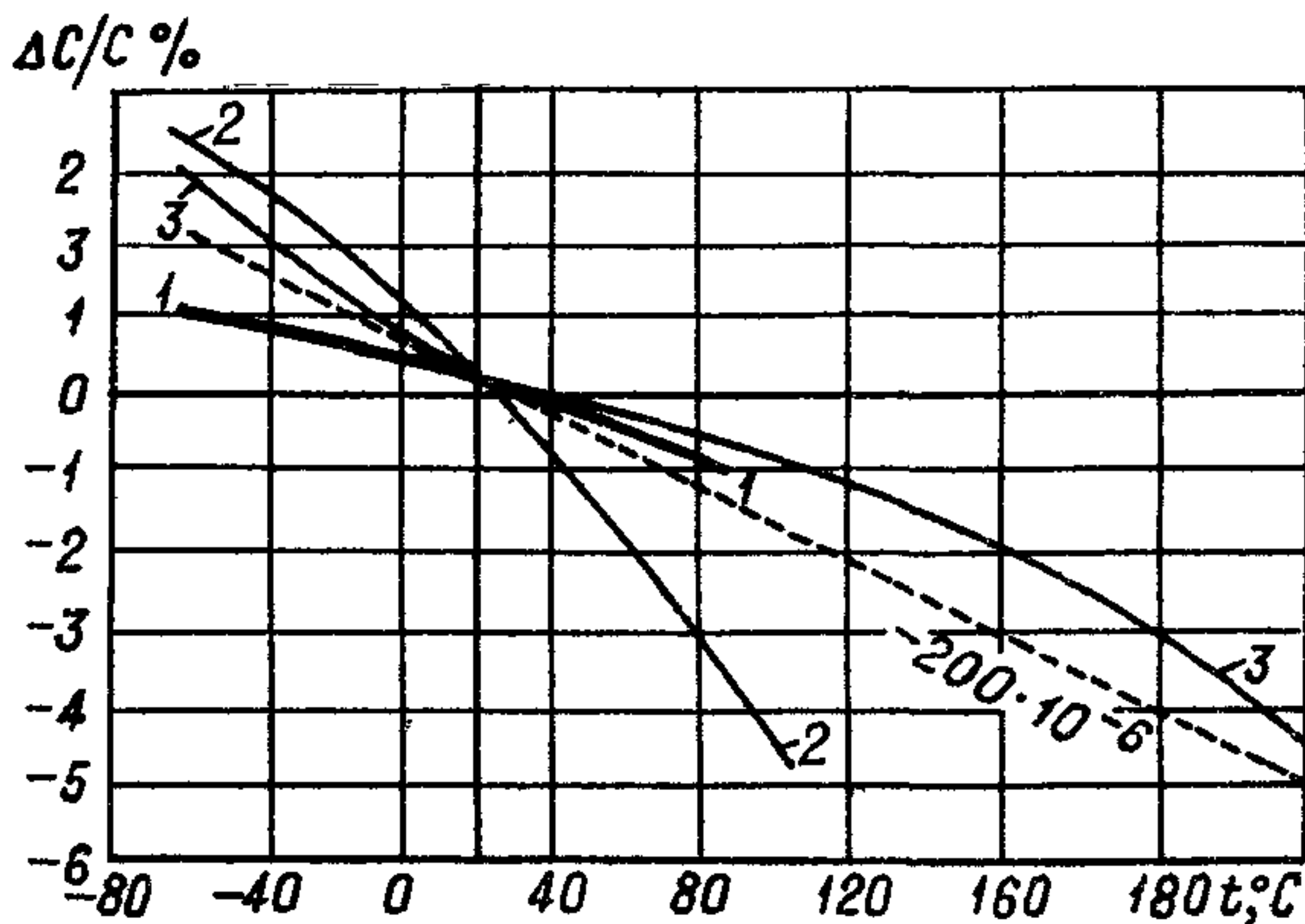


Рис. 256. Зависимость емкости пленочных конденсаторов с неполярным диэлектриком от температуры при частоте 1 кГц.

1 — полистирольный; 2 — полиэтиленовый; 3 — фторопластовый (прерывистая линия соответствует $\text{TKE} = -200 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$)

применяя намотку с одновременным контролем емкости, можно получить допуск по емкости $\pm (1-2)\%$; применяя специальные методы подгонки, например подгоночные секции (см. рис. 5, а),

добиваются допуска $\pm (0,1—0,2)\%$. Такие узкие допуски есть смысл применять лишь для герметизированных конденсаторов, когда исключено влияние влажности, которое хотя и невелико, но уже может вызывать изменения емкости, превышающие допуск. Для конденсаторов открытого типа обычно применяют такие же допуски, как для бумажных: ± 5 , ± 10 , $+20\%$. Для герметизированных конденсаторов большой емкости можно получать при 20°C постоянную времени порядка 10^6 сек (§ 11), необычно высокую по сравнению с другими типами конденсаторов; при этом необходимо применять керамические изоляторы, так как утечка по поверхности стекла уже сравнима с внутренней утечкой конденсаторной секции и даже может ее превышать.

Кратковременная электрическая прочность полистирольной пленки высока (см. рис. 247, а), но в ней имеются слабые места, которые заставляют принимать большой запас по электрической прочности при выборе $E_{\text{раб}}$, особенно при большой емкости, т. е. большой площади обкладок. При обкладках из фольги и постоянном напряжении можно указать следующие значения $E_{\text{раб}}$:

Номинальная емкость, мкф	Толщина диэлектрика, мм	$U_{\text{ис}}, \text{ в}$	$U_{\text{раб}}, \text{ в}$	$E_{\text{раб}}, \text{ кв/мм}$
0,1—0,2	2×20	500	250	6,25
0,003—0,1	2×20	1000	500	12,5
0,003—0,05	3×20	2000	1000	13,3

По отношению к среднему значению $E_{\text{пр}}$ эти величины дают запас порядка 10—20 раз. При этом учитывается, что $E_{\text{пр}}$ в готовых конденсаторах может дополнительно снизиться по сравнению с $E_{\text{пр}}$ пленки вследствие появления добавочных слабых мест за счет попадания пыли в процессе намотки, а также вдавливания фольги в пленку в процессе запекания. При использовании пленки тоньше 20 мм количество слабых мест возрастает, и $E_{\text{раб}}$ надо дополнительно снижать, получая и снижение номинального напряжения. При изготовлении конденсаторов большой емкости применяют металлизацию полистирольной пленки, позволяющую поднять $E_{\text{раб}}$ до 12—13 кв/мм, для металлизированных конденсаторов малой емкости — до 20 кв/мм. Как указывалось выше (§ 23), способность металлизированного полистирола к самовосстановлению при пробое хуже, чем у бумаги; если для однослойного металlobумажного конденсатора, увеличивая напряжение, можно получить полную потерю емкости («обрыв») (рис. 241), то для полистирольного металлизированного конденсатора уже после потери емкости порядка 1—1,5% обычно происходит короткое замыкание обкладок, т. е. пробой. При одном слое пленки (30 мм) кратковременное пробивное напряжение металлопленочных конденсаторов составляет 1500—3000 в; при двух слоях по 20 мм — 2800—5000 в.

При переменном напряжении для запеченных полистирольных конденсаторов приходится учитывать остаточное содержание воздуха, который не полностью удаляется при запекании (рис. 257) и может привести к развитию ионизационных явлений в диэлектрике, если напряжение превышает порог начала ионизации (400—450 в при диэлектрике 2×20 и 3×20 или 2×30 мкм). Для полистирольных конденсаторов, рассчитанных на постоянное напряжение, допускают эффективное значение переменного напряжения при частоте 500 гц не выше 100—250 в в зависимости от $U_{\text{ном}}$; при частотах до 10 кгц эти значения снижают до 20—100 в. Напряже-

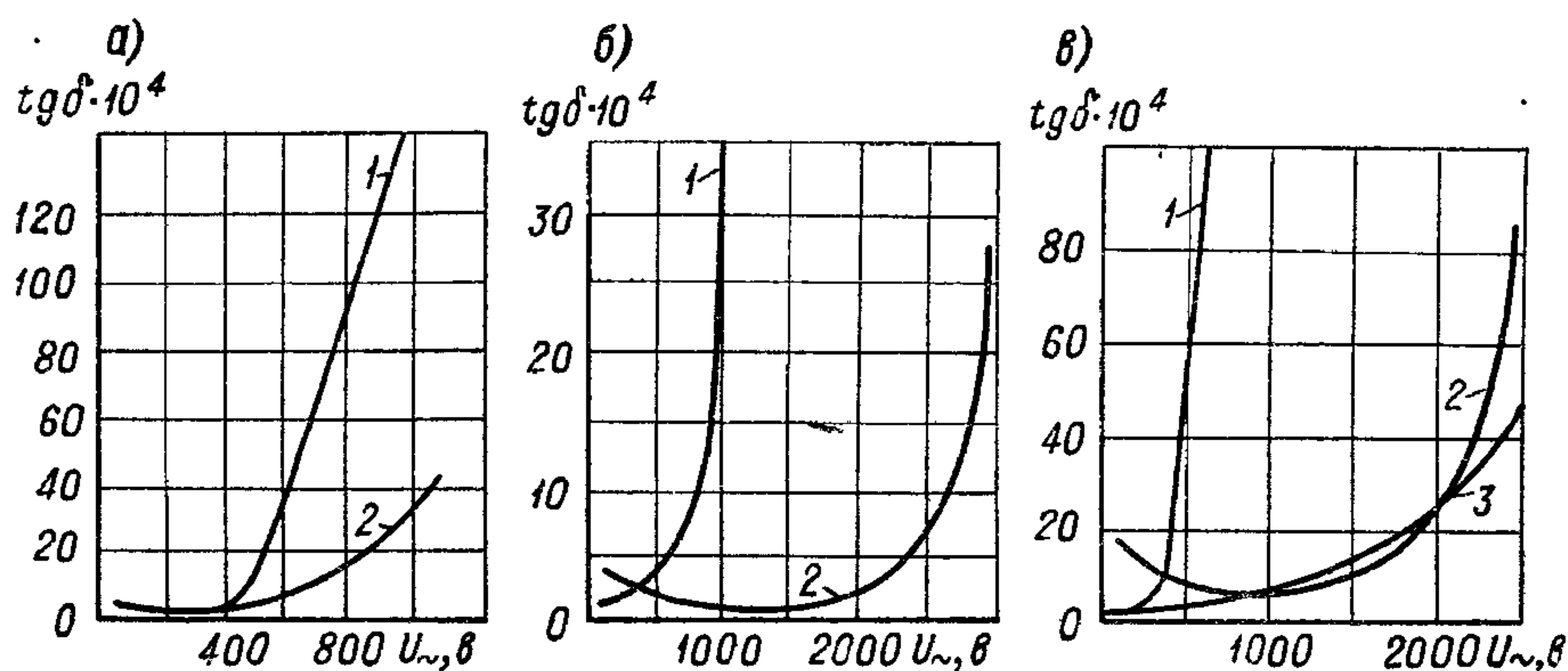


Рис. 257. Зависимость угла потерь пленочных конденсаторов с неполярным диэлектриком от переменного напряжения ($f=50$ гц): а — полистирольные конденсаторы.

1 — незапеченный; 2 — запеченный;

б — полистирольные конденсаторы.

1 — незапеченный; 2 — пропитанный маслом;

в — фторопластовые конденсаторы.

1 — секция на воздухе; 2 — секция залита жидким диэлектриком; 3 — секция в среде сжатого азота, 5 атм.

ние начала ионизации полистирольного конденсатора можно повысить, применяя его пропитку маслом (рис. 256), что позволяет повысить $E_{\text{раб}}$ и допускаемое напряжение на одну секцию. При этом надо применять незапеченные секции, чтобы облегчить проникновение масла внутрь секции при пропитке и использовать масло высокой очистки, лишенное ароматических соединений, вызывающих разрушение полистирольной пленки. Конденсаторы такого типа начинают находить применение в качестве силовых конденсаторов для электротермических устройств при частотах 1—10 кгц, когда применение бумажных конденсаторов связано с необходимостью использования водяного охлаждения, которое делается ненужным при замене бумажного диэлектрика полистирольным. Следует отметить, что при пропитке (в связи с отсутствием стабилизирующего эффекта запекания и появления между-слойной поляризации в масляных прослойках) ухудшается ста-

бильность емкости и резко возрастает коэффициент абсорбции, который в непропитанных полистирольных конденсаторах имеет очень малые значения (§ 14).

Фторопластовые конденсаторы. Пленка из ПТФЭ (фторопласта-4), близкая к полистирольной по своим электрическим свойствам, отличается резко повышенной нагревостойкостью; кроме того, в отличие от жесткой полистирольной пленки, имеющей удлинение порядка 3%, пленка из ПТФЭ эластична и ее удлинение при разрыве достигает 100—200%. Благодаря увеличенной эластичности можно было бы ожидать меньшего влияния технологии изготовления конденсатора на появление слабых мест в диэлектрике и соответственно повышения электрической прочности конденсаторов в сравнении с полистирольными; этому мешает большое исходное число дефектов в пленке типа сквозных отверстий, особенно при малых толщинах. Поэтому результаты определения $E_{пр}$ этой пленки обычно указывают не для одного, а для нескольких слоев (рис. 247, в). Пленку толщиной 5—6 мкм приходится применять не меньше, чем в три слоя; обычно применяют более толстые пленки (10—20 мкм). Значения $E_{раб}$ при температуре до 200° С и емкостях до 0,05—0,1 мкф составляют:

Толщина диэлектрика, мкм	Рабочее напряжение, в (пост. ток)	$E_{раб}$, кв/мм
3 × 5	200	13,3
3 × 10	600	20
4 × 10	1000	25

Все же эти значения выше, чем допускается для полистирольной пленки, притом при значительно меньших температурах. При температуре 150° С, многослойном диэлектрике и малой емкости значения $E_{раб}$ повышают до 40—50 кв/мм. Новая серия металлизированных фторопластовых конденсаторов имеет диэлектрик 2 × 10 мкм (одна пленка металлизированная, вторая — нет); допускаемые напряжения установлены в зависимости от емкости: от 500 в при малых емкостях, до 200 в при больших, порядка микрофарад: это дает значения $E_{раб}$ от 25 до 10 кв/мм при рабочей температуре 200° С. Металлизация позволяет снизить удельный объем низковольтных фторопластовых конденсаторов примерно в 3 раза.

Ничтожная гигроскопичность ПТФЭ позволяла бы изготавливать из него конденсаторы открытого типа, но этому препятствуют эластичность и мягкость пленки; поэтому конденсаторы низкого напряжения из такой пленки обычно собирают в трубчатых алюминиевых корпусах, закрывая торцы шайбами из толстого ПТФЭ. При необходимости обеспечить высокую постоянную времени

используют герметизированные сварные конструкции. При разработке фторопластовых конденсаторов высокого напряжения возникла необходимость замены воздуха в зазорах между слоями пленки диэлектриком с большей электрической прочностью для повышения напряжения начала ионизации. Применение жидкого диэлектрика встретило ряд затруднений, прежде всего в направлении подыскания жидкости, которая по нагревостойкости соответствовала бы пленке ПТФЭ. Выход из затруднения был найден путем использования герметизированных керамических корпусов, которые после сборки в них секций конденсатора заполнялись сжатым азотом при давлении 4—5 *атм*. Это позволило резко повысить $U_{\text{ион}}$ (рис. 257, в) и применить значение рабочего напряжения на одну секцию до 1 *кв* при частоте 50 *гц* и до 2—5 *кв* при постоянном напряжении.

Постоянная времени конденсаторов из пленки ПТФЭ очень велика: при температуре 200° С удается получать τ до 1000 *сек* при фольговых электродах и до 100 *сек* — при металлизированных, при комнатной температуре — до 10^6 *сек*. По углу потерь и коэффициенту абсорбции эти конденсаторы даже несколько лучше полистирольных. Стабильность емкости во времени — несколько хуже, чем у полистирольных, — обычно до 0,2—0,5%, норма на ТКЕ для фольговых конденсаторов — не выше — $200 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, причем часто получаются меньшие значения, в зависимости от конструкции секции и режима запекания: иногда наблюдались даже небольшие положительные значения ТКЕ. Для металлизированных конденсаторов норма по ТКЕ расширена до — $350 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Основным преимуществом фторопластовых конденсаторов является их высокая нагревостойкость, недостатком — высокая стоимость, ограничивающая возможность их широкого применения.

Полиэтиленовые и полипропиленовые конденсаторы. До последнего времени конденсаторы из полиэтиленовой пленки толщиной 30—50 *мкм* изготавливались только в США с относительно высоким рабочим напряжением, не ниже нескольких киловольт, в связи с повышенной толщиной диэлектрика. Позже появились сведения об изготовлении полиэтиленовых конденсаторов низкого напряжения и небольшой емкости в Японии, очевидно в связи с появлением в этой стране полиэтиленовой пленки пониженной толщины. В СССР до последнего времени выпускалась только толстая пленка ПЭ, которая нашла себе известное применение в импульсных конденсаторах высокого напряжения, как в чистом виде, так и в комбинации с бумагой. Удачные опыты по получению пленки толщиной 10—15 *мкм* позволят использовать ее и в конденсаторах низкого напряжения. Как уже отмечалось, основным недостатком этой пленки является повышенный ТКЕ (рис. 256), что препятствует применению полиэтиленовых конденсаторов в контурах стабильной частоты, тем более, что и стабильность во времени у них хуже, чем у полисти-

рольных или фторопластовых. По величине $\operatorname{tg} \delta$ и постоянной времени они также уступают последним, равно как и по величине k_a , который для них равен 0,2—0,5%. По эластичности полиэтиленовая пленка подобна фторопластовой, но имеет меньше слабых мест, так как технология ее получения иная; поэтому можно полагать, что значения $E_{\text{раб}}$ для полиэтиленовых конденсаторов будут больше, чем для рассмотренных выше неполярных пленок. Верхний предел рабочей температуры для этих конденсаторов 85—90° С; при облучении его можно поднять на 20—30° С, если исключен доступ кислорода к конденсаторной секции. Дешевизна полиэтилена должна обеспечить его применение в тех случаях, когда нужен конденсатор с неполярным диэлектриком для менее ответственной работы.

Конденсаторы из полипропиленовой пленки появились в Италии (где этот материал был впервые получен) в виде низковольтных конденсаторов для электронной техники с верхним пределом температуры 100° С; по-видимому, в дальнейшем удастся несколько поднять этот предел, так как по нагревостойкости полипропилен значительно превосходит полиэтилен. Толщина пленки 10—20 мкм. Выпуск такой пленки начат теперь и в ФРГ; применением ее в конденсаторах заинтересовались специалисты в ряде стран. По-видимому, конденсаторы из этой пленки по свойствам будут близки к полиэтиленовым, но, возможно, будут еще дешевле. По последним данным, фирма «Икар» (Италия) применила эту пленку в комбинации с бумагой для силовых конденсаторов, предназначенных для работы при частоте 50 гц (§ 86).

Синтаровые конденсаторы. Недавно в США появился новый тип конденсатора под маркой синтар (Synthar), иначе называемый конденсатором из синтетической смолы, изготовляемый из пленки полифенилоксиды (табл. 23). Конденсаторы изготовляются с номинальной емкостью от 4000 пф до 150 мкф при номинальном напряжении 100—600 в (пост. ток), но могут применяться (при соответствующем снижении напряжения) и в цепях переменного тока, вплоть до радиочастоты. Допуск по емкости: от ± 1 до $\pm 20\%$, $\operatorname{tg} \delta = 4 \cdot 10^{-4}$ при частоте 120 гц и $6 \cdot 10^{-4}$ — при 1 Мгц. Величина $R_{\text{из}}C = 3,5 \cdot 10^5$ сек при 25° С и $2 \cdot 10^4$ сек — при 125° С. Испытательное напряжение равно $2U_{\text{ном}}$. Верхний предел рабочей температуры +125° С без снижения $U_{\text{ном}}$, нижний предел до —65° С (возможно даже до —75° С). Конденсаторы выпускаются в цилиндрических герметизированных корпусах; удельный заряд составляет до 16,5—17,7 мкк/см³, т. е. сравним с данными для наших лавсановых конденсаторов (см. ниже, табл. 25). Особенностью синтаровых конденсаторов является высокая температурная стабильность емкости: в пределах от +20 до +125° С изменение емкости не превышает $\pm 0,12\%$, а $\text{ТКЕ} = \pm 35 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ (т. е. лучше, чем для слюдяных конденсаторов группы Г), при снижении температуры от +20 до —75° С емкость уменьшается только

на 2,1%; в этой области температур ТКЕ имеет следующие значения:

$t^{\circ}\text{C}$	ТКЕ, $\text{град}^{-1}\times 10^6$
— (75—40)	+ (320—330)
— (40—20)	+ 255
— 20÷0	+ 150
0 ÷ + 20	+ 80

Указывается, что пленка имеет $E_{\text{пр}} = 220 \text{ кВ/мм}$ и коэффициент линейного расширения $67 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Некоторые данные об отечественных конденсаторах с диэлектриком из синтетических пленок приведены в табл. 25. Сравнение температурной зависимости постоянной времени различных типов пленочных конденсаторов было показано выше на рис. 13.

Таблица 25

Пленочные конденсаторы с органическим синтетическим диэлектриком

Тип	Диэлектрик	$C_{\text{ном}},$		$U_{\text{ном}}, \text{В}$	Максимальный заряд		$t_{\text{макс}}, ^{\circ}\text{C}$	Конструкция
		нФ	мкФ		мкК	мкК/см^2		
ПМ-1	Полистирол	510	0,01	60	0,6	0,43	70	Открытая
ПМ-2	То же	510	0,01	60	0,6	0,26	70	Уплотненная
ПОВ	» »	390	—	15 000	5,8	0,42	70	Открытая
К70-3	» »	390	—	15 000	5,8	1,05	60	»
МПО *	» »	1000	0,5	250—600	60	5,0	60	Уплотненная
МПГО *	» »	$5 \cdot 10^5$	10	160—400	1600	3,8	60	Герметизированная
К72П-6	ПТФЭ	470	1	200—1600	470	1,5	200	То же
К72-9 *	»	$1 \cdot 10^4$	1	300—500	300	4,4	200	» »
ФГТИ	»	470	0,1	2000—25 000	60	1,25	155	» »
ФТ	»	510	0,25	200—600	60	2,0	200	Уплотненная
К74-7	ПЭТФ	390	—	16 000	6,2	1,7	70	»
К73П-4 **	»	$5 \cdot 10^5$	15	250	3750	30	70	Герметизированная
К73П-2 ***	»	$47 \cdot 10^3$	20	100—1000	2000	25	85	Уплотненная
К76П-1	ТАЦ	$47 \cdot 10^4$	22	50	1100	50	70	Герметизированная и уплотненная
К76-2	ТАЦ + ЭЦ	$47 \cdot 10^4$	22	100	2200	100	85	То же

* С металлизированной обкладкой.

** Лавсановый конденсатор повышенной точности: $\Delta C_{\text{н}} = \pm 1\%$; ТКЕ $= \pm 200 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

*** Лавсановый конденсатор для печатного монтажа. См. также примечание к табл. 15.

§ 84. Конденсаторы с диэлектриком из полярных синтетических пленок

Полиэтилентерефталатные конденсаторы (лавсановые). Как уже отмечено выше, пленка ПЭТФ является основным типом полярной пленки, применяемым в мировом конденсаторостроении. По величине ε эта пленка уступает бумаге, но по $E_{пр}$ превосходит ее, а потому удельные характеристики для этого типа пленочных конденсаторов можно получить лучшие, чем для бумаги; при низком напряжении используется чисто пленочный диэлектрик, при повышенных напряжениях обычно применяют комбинацию из пленки ПЭТФ и конденсаторной бумаги. Верхний предел температуры для конденсаторов из пленки ПЭТФ за рубежом указывается от $+85$ до 150°C . При температурах до 85°C можно гарантировать достаточно высокую температурную стабильность емкости, дальнейшее повышение температуры дает уже резкое возрастание ε и соответственно увеличение емкости, при 150°C ΔC может превышать 15% (рис. 249). Кроме того, при таких температурах надо уже сильно снижать $U_{раб}$ (до 3 раз в сравнении с $U_{ном}$); по-видимому, разумным верхним пределом рабочей температуры следует считать 125°C , когда изменение емкости еще не очень велико, а $U_{раб}$ имеет приемлемые значения. При обкладках из фольги и однослойном диэлектрике 9—10 мкм при указанном значении $t_{\text{макс}}$ можно брать $E_{раб} \approx 8 \div 10 \text{ кВ/мм}$ при емкостях 0,1—1 мкф , при малых емкостях можно повышать $E_{раб}$ до 15 кВ/мм и даже выше. Намотку однослойных фольговых конденсаторов следует вести в обеспыленном помещении, так как иначе количество закороченных образцов может быть очень большим (до 25—50% при емкостях порядка 0,5—1,0 мкф). Для многослойных фольговых конденсаторов $E_{раб}$ повышается до 30—40 кВ/мм (номинальное напряжение до 1000 в).

При испытании однослойных металлизированных конденсаторов из пленки ПЭТФ была установлена неустойчивость сопротивления изоляции, у многих образцов $R_{из}$ заметно снижалось со временем. Просверлив отверстие в корпусе конденсатора, можно было получить восстановление сопротивления изоляции. Это явление объясняется наличием полупроводящих продуктов гидролитического разложения пленки в местах самовосстановления при тренировке напряжением для изолирования слабых мест диэлектрика. При соединении внутреннего объема конденсатора с окружающей средой летучие продукты, вызывавшие повышенную проводимость, удаляются и $R_{из}$ восстанавливается. Это явление можно устранить или сильно ослабить, применяя тщательную сушку секций и помещая их в корпуса в нагретом состоянии, с последующей немедленной запайкой корпуса. При отсутствии влаги в конденсаторной секции процесс гидролитического распада пленки и связанные с ним последствия не должны иметь места.

Допуск по емкости для конденсаторов из пленки ПЭТФ обычно берется, как для бумажных конденсаторов: $\pm 5\%$ или больше. По коэффициенту абсорбции пленочные конденсаторы, хотя и уступают полистирольным, но много лучше бумажных, по сравнению с полистирольными они имеют значительно меньший объем, а потому есть смысл применять их, когда нужны конденсаторы большой емкости с малой абсорбцией. Постоянная времени у конденсаторов из пленки ПЭТФ может достигать 10^5 сек при 20°C , т. е. лежит между соответствующими значениями для полистирольного и бумажного конденсаторов (см. таблицу, § 11 и рис. 13),

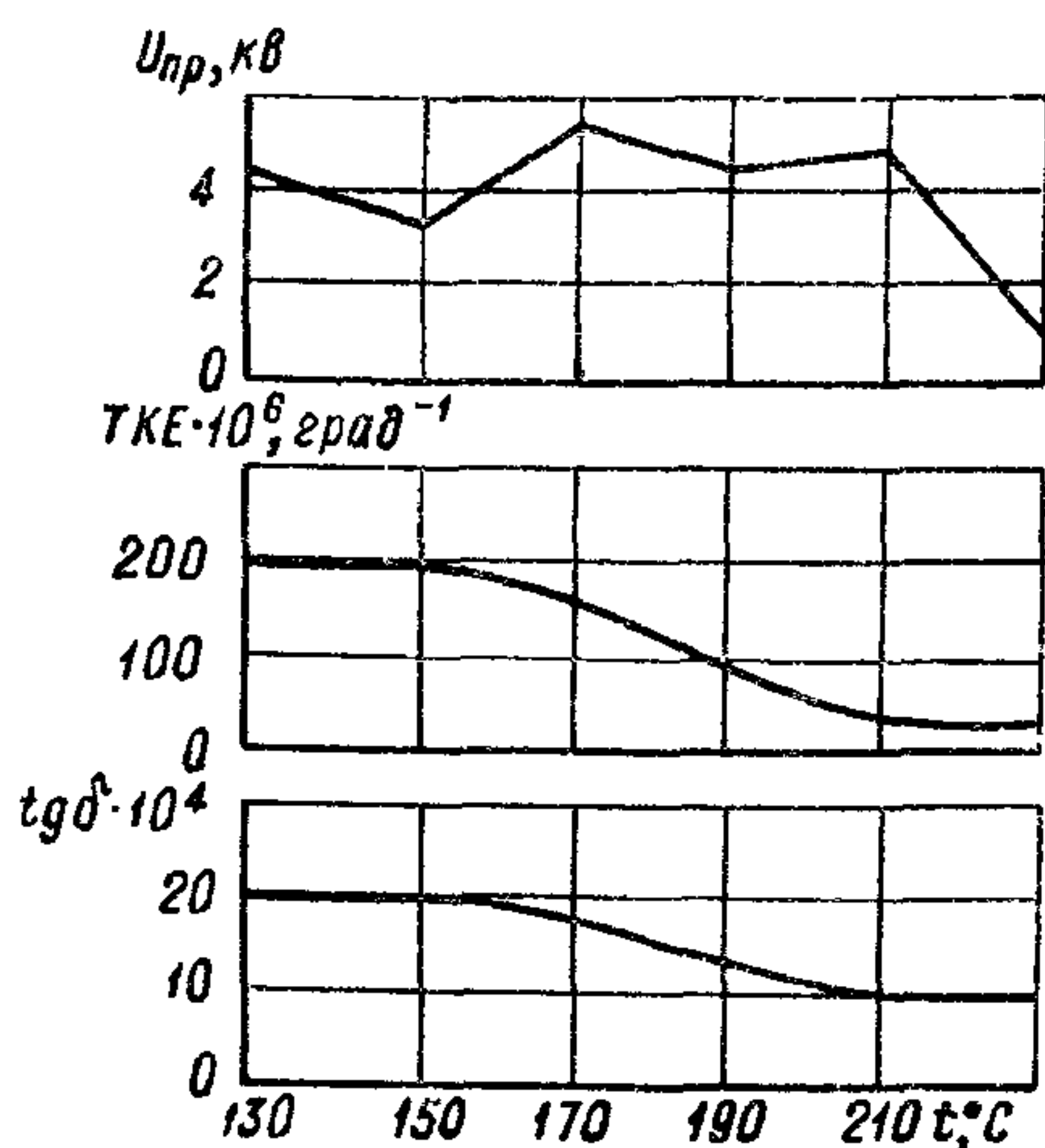


Рис. 258. Зависимость электрических свойств секций из пленки ПЭТФ от температуры запекания.

при температуре 125°C для герметизированных конденсаторов можно получать до 50 сек.

Электрические свойства конденсаторов из пленки ПЭТФ (угол потерь и постоянная времени) зависят от соотношения аморфной и кристаллической фаз в пленке. В исходной пленке содержание аморфной фазы повышено, что способствует улучшению ее механических свойств; в готовом конденсаторе механическая прочность пленки имеет второстепенное значение и целесообразно увеличить содержание кристаллической фазы путем соответствующей термической обработки. В связи с этим процесс запекания полиэтилен-

терефталатных конденсаторов способствует не только стабилизации емкости, как у полистирольных, но также и повышению $R_{\text{из}}$ и некоторому снижению $\text{tg } \delta$ (рис. 258). Для облегчения процесса кристаллизации пленки необходимо медленно охлаждать конденсаторы после их запекания. Чрезмерно высокая температура запекания приводит к снижению электрической прочности, так же как и в случае полистирольных конденсаторов.

Зависимость угла потерь полиэтилентерефталатных конденсаторов от температуры повторяет ту же зависимость для исходной пленки (рис. 249); величина $\text{tg } \delta$ этих конденсаторов немного выше, чем у бумажных с неполярной пропиткой, но в области температур выше 120°C снижается с температурой, тогда как у бумажных конденсаторов $\text{tg } \delta$ при температурах выше 100°C начинает систематически возрастать. Величина высокотемпературного максимума $\text{tg } \delta$ снижается при увеличении содержания кристаллической фазы в пленке, на низкотемпературный максимум это не влияет.

Относительно малая гигроскопичность пленки ПЭТФ позволяет изготавливать из нее конденсаторы открытого типа (как полистироль-

ные) для работы при нормальной влажности. При расчете на повышенную или высокую влажность применяют уплотненные конструкции с заливкой эпоксидной смолой (рис. 254, б) или герметизированные корпуса, как в случае бумажных конденсаторов. При прочих равных условиях изменения электрических свойств незащищенных секций из пленки ПЭТФ под действием влажности выражены значительно слабее, чем у бумажных конденсаторов.

Поликарбонатные конденсаторы. Конденсаторы из поликарбонатной пленки в последнее время начали изготавливаться рядом зарубежных фирм, сначала из пленки макрофоль, приобретаемой в ФРГ, а затем и из пленки собственного производства (например, в США). Верхний предел рабочей температуры обычно указывается равным $100\text{--}125^\circ\text{C}$, т. е. примерно тот же, что и для полиэтилентерефталатных конденсаторов. Нижний предел толщины рулонной пленки выше¹, чем для пленки ПЭТФ (если не считать возможности применения пленки толщиной до 2 мм в лакопленочных конденсаторах), а потому по удельным характеристикам эти конденсаторы уступают полиэтилентерефталатным. Выше уже отмечалось, что преимуществом поликарбонатной пленки по сравнению с пленкой ПЭТФ является малый $\operatorname{tg} \delta$ (рис. 250), несколько повышенная постоянная времени и резко улучшенная стабильность емкости. Зависимость емкости запеченного поликарбонатного конденсатора от температуры показана на рис. 259. Небольшое снижение емкости происходит как при нагревании, так и при охлаждении; при правильном режиме запекания и рациональной конструкции можно получать значения ТКЕ в области отрицательных и положительных температур, не превышающих $\pm 50 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, т. е. как у лучших слюдяных конденсаторов массового производства. По удельным характеристикам поликарбонатные конденсаторы значительно лучше полистирольных и превосходят их по нагревостойкости и стабильности емкости с температурой, по углу потерь, постоянной времени и абсорбции они им уступают. Этот тип конденсатора значительно облегчает выбор конденсатора большой емкости с малым углом потерь и высокой стабильностью.

Прочие типы конденсаторов с полярным пленочным диэлектриком. В США некоторое применение нашли конденсаторы из триацетатной пленки под названием пластикон А, выпускавшиеся, однако, только одной из американских фирм. По электрическим характеристикам эти конденсаторы близки к бумаж-

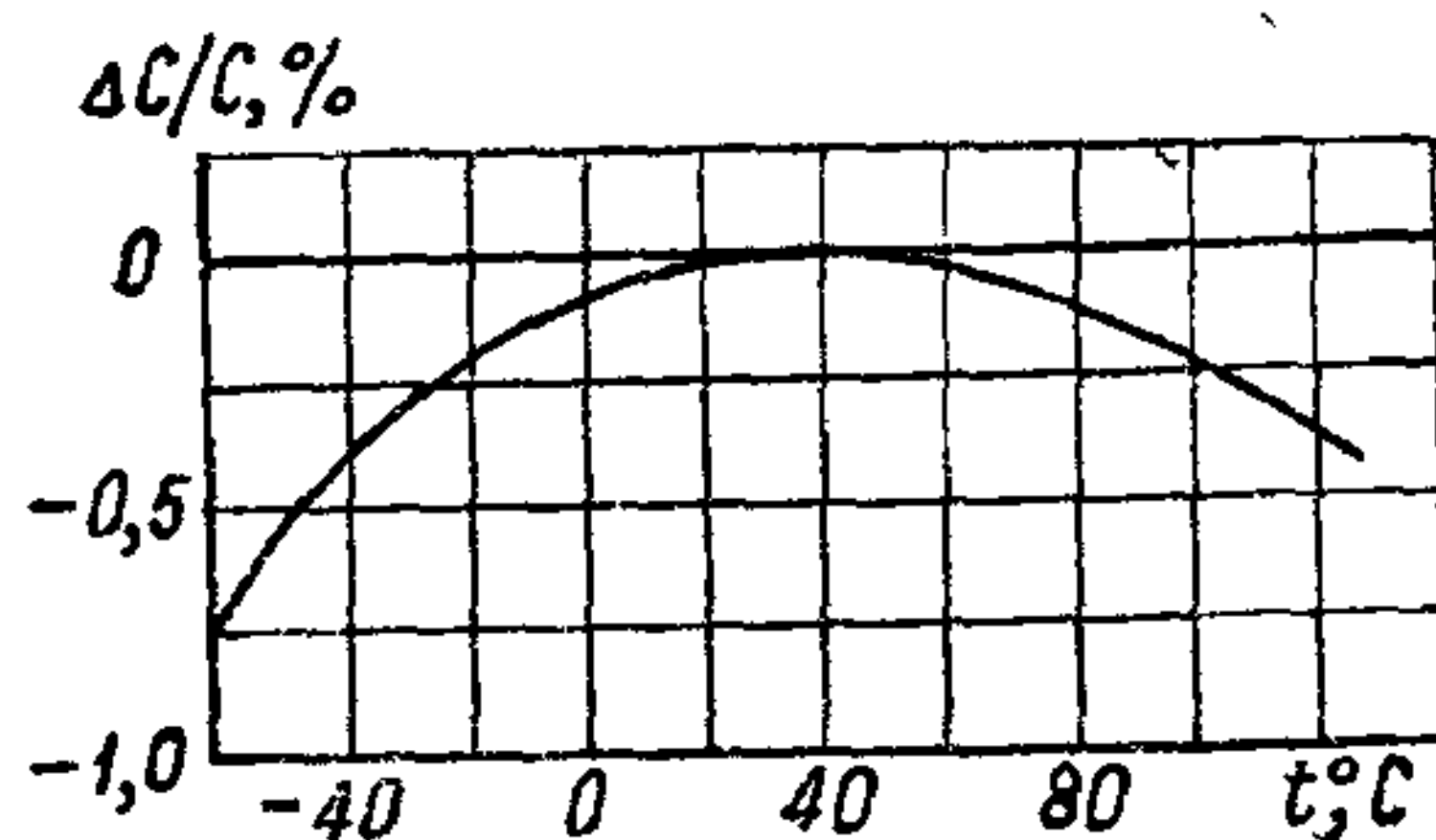


Рис. 259. Зависимость емкости правильно запеченного поликарбонатного конденсатора от температуры.

¹ См. сноску на стр. 439.

ным, хотя угол потерь у них несколько выше, а стабильность емкости хуже (рис. 252 и 239, б), чем у лучших образцов бумажных конденсаторов с неполярной пропиткой. При температурах до 65°C для этих конденсаторов указывался удельный объем в 2 раза меньший, чем для бумажных конденсаторов при напряжениях 1—2 кВ; верхний предел температуры $+100^{\circ}\text{C}$ при пропитке маслом и 125°C при пропитке жидким полисилоксаном; однако при этом предусматривалось такое снижение $E_{\text{раб}}$, что преимущество в удельных характеристиках в сравнении с бумажными конденсаторами уже исчезало. Учитывая недостаточную устойчивость триацетатной пленки при воздействии электрического поля и высокой температуры, ее нельзя считать перспективным диэлектриком для обычных конденсаторов; она, вместе с тем, нашла себе применение в лакопленочных конденсаторах. Для применения в конденсаторостроении представляют значительный интерес пленки из полиарилатов и полиимидов, позволяющие значительно повысить рабочую температуру конденсаторов, примерно на $50\text{—}100^{\circ}\text{C}$, по сравнению с конденсаторами из обычных полиэфирных пленок ПЭТФ или поликарбоната. Можно ожидать внедрения этих нагревостойких пленок в конденсаторное производство. В небольшом масштабе полиимидную пленку каптон уже начинают применять в США.

Задача повышения ϵ полярных пленок, как уже отмечалось выше, пока еще не нашла решения, так как пленка из цианэтилцеллюлозы (в США она выпущена под названием цианосель), имеющая повышенные значения ϵ , недостаточно удовлетворительна по величине $\text{tg } \delta$ и, особенно, $\rho_{\text{об}}$. В области получения новых типов нагревостойких пленок для конденсаторостроения и в области повышения их ϵ можно ожидать продолжения интенсивных исследований в ближайшие годы.

§ 85. Тонкослойные конденсаторы с органическим диэлектриком

Выше было отмечено, что для наиболее прочной синтетической пленки ПЭТФ удалось получить нижний предел толщины, равный 3,8 мкм, для других типов пленок он еще выше, порядка 6—8 мкм и больше. При таких толщинах использование диэлектрика при номинальных напряжениях, требующихся для малогабаритной аппаратуры с полупроводниковыми приборами, является еще неполным, так как фактические значения $E_{\text{раб}}$ оказываются ниже допустимых. Иными словами, возникает возможность дополнительного снижения толщины диэлектрика и соответственного улучшения удельных характеристик конденсатора.

Как известно, одним из технологических приемов получения синтетических пленок является их отливка из раствора. При этом обычно удается получать толщины порядка 10—12 мкм, так как при наличии остатков растворителя до их полного удаления пленки имеют пониженную механическую прочность. Однако применение

подложки позволяет снизить толщину пленки, получаемой отливкой из раствора, до 2—3 мкм. Конденсаторы с диэлектриком в виде тонких пленок, полученных отливкой из раствора (лака), называют лакопленочными. Они могут быть двух типов: с удаленной подложкой и с сохраненной подложкой. При изготовлении конденсаторов с удаленной подложкой механическая поддержка тонкой пленки осуществляется только во время операций получения пленки (отливки, сушки), при металлизации и при разрезке широкой металлизированной ленты на более узкие. После этого подложка отделяется (рис. 260) и тонкая пленка лака, уже покрытая слоем металла, осторожно наматывается в отдельные рулончики, которые далее ставятся на намоточный станок. Последний должен быть облегченного типа, чтобы не давать обрывов тонкой пленки в процессе намотки секций. Намотка ведется из двух пленок с соответственно сдвинутыми краями (рис. 261, а).

В качестве подложки используют лакированную бумагу, синтетическую пленку или металлическую фольгу (последняя нежелательна, так как дефекты ее поверхности отражаются

в виде слабых мест в получаемой пленке). Слой лака на поверхности бумаги не должен разрушаться растворителем, используемым для получения пленки диэлектрика. Лакопленочные конденсаторы с удаленной подложкой были получены впервые с применением раствора триацетата (у нас такие конденсаторы имеют обозначение К76П-1, см. табл. 25). При толщине пленки 3 мкм удельный объем их был в три раза меньше, чем у металлобумажных конденсаторов. Удельная емкость при напряжении 50 в имела рекордное значение 1 мкф/см³. Норма на постоянную времени для этих конденсаторов была установлена равной 100 сек, но эта характеристика была недостаточно устойчивой и в ряде случаев имела тенденцию к снижению. Величина tg δ при частоте 1 кГц должна была составлять не более 0,015. Допуск по емкости: ±5, ±10 и +20%. Зависимость емкости и постоянной времени от температуры

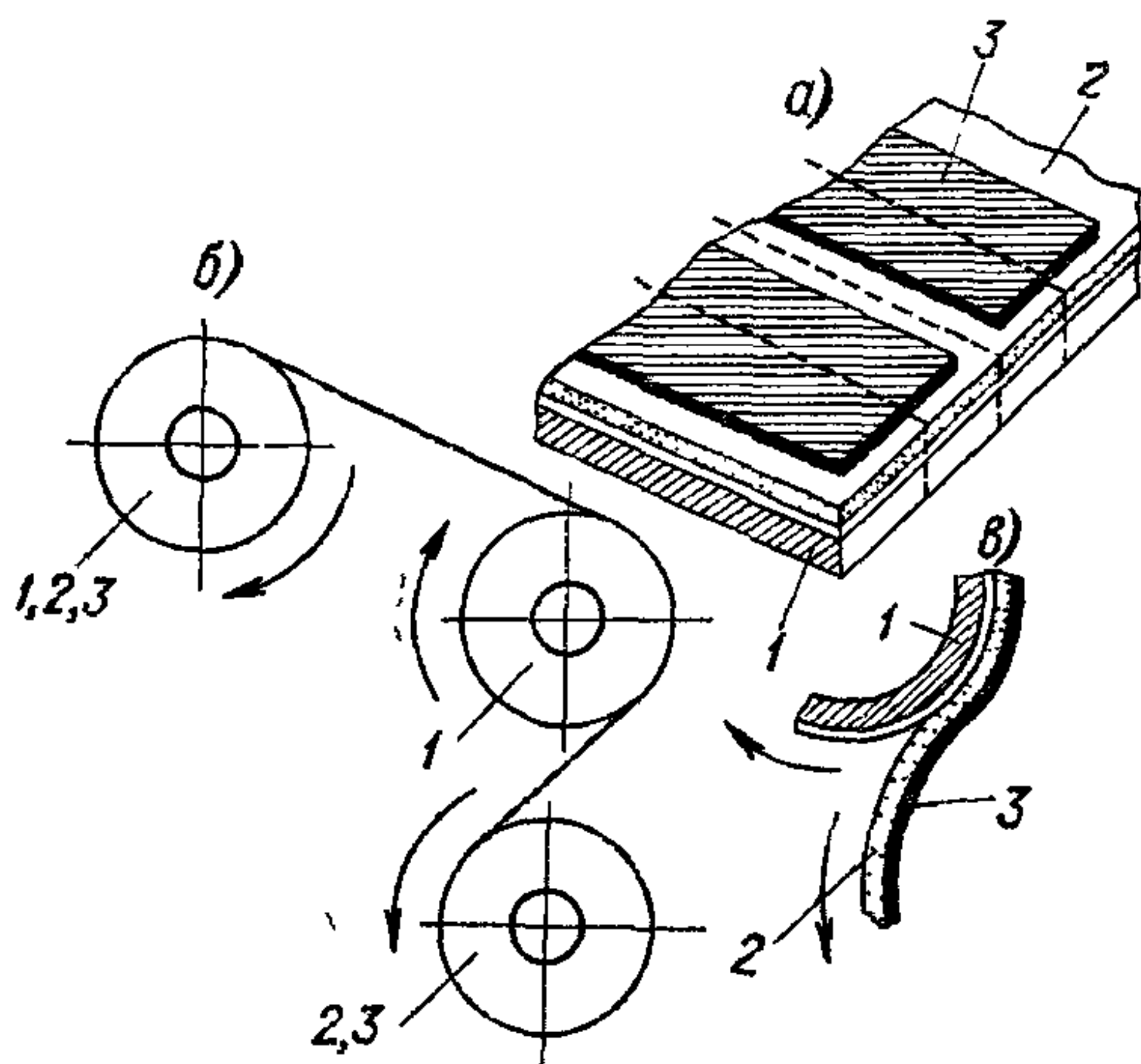
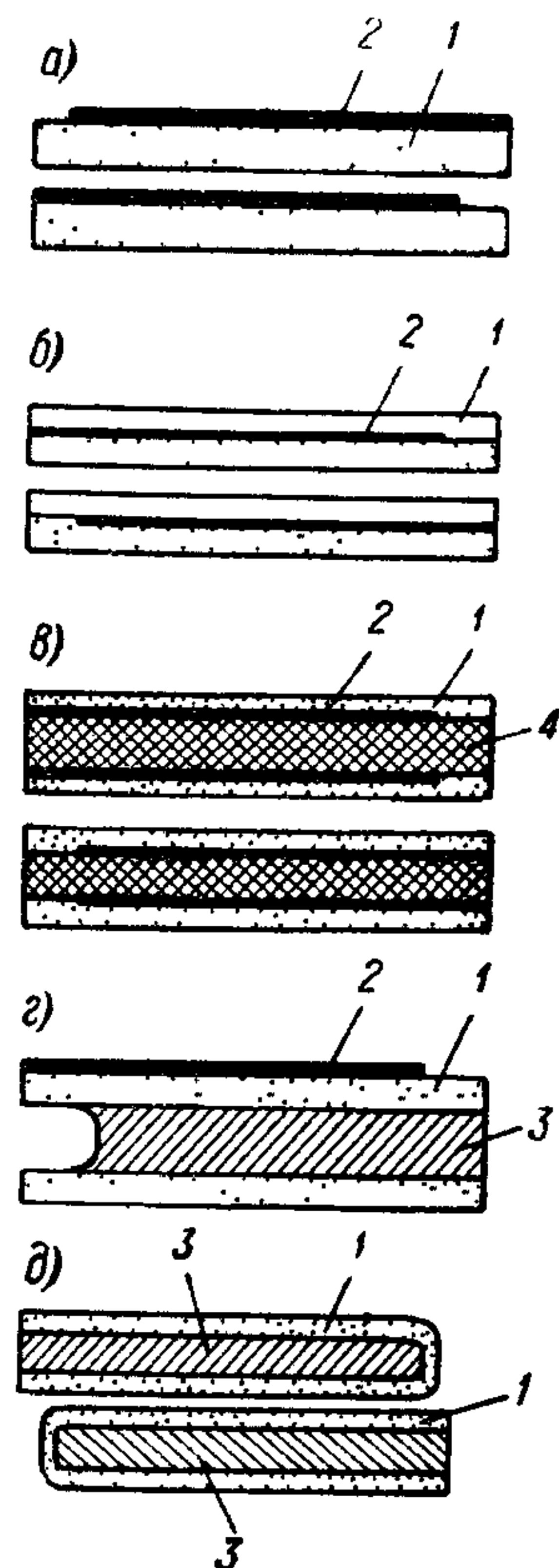


Рис. 260. Изготовление лакопленочного конденсатора: а — подложка с лаковой пленкой после металлизации (пунктиром показаны линии разреза после металлизации перед отделением лаковой пленки); б — схема перемотки при отделении пленки; в — схема отделения металлизированной лаковой пленки.

1 — подложка (лакированная бумага); 2 — рабочая лаковая пленка; 3 — слой металла на рабочей лаковой пленке.

дана на рис. 262 в виде кривых 1. Было показано, что неустойчивость постоянной времени этих конденсаторов связана с дефектами изоляции в местах удаления обкладки при тренировке напряжением; неустойчивость усиливается при увеличении числа слабых мест в пленке, где происходит самовосстановление при тренировке.



В случае тонких лаковых пленок такие дефекты возникают при металлизации за счет проникновения металла в тонкие поры, имеющиеся в пленке. Это явление можно резко ослабить, применяя двухслойную лакировку с междуслойной металлизацией (рис. 261, б). В этом случае сначала наносится слой первого лака, затем он металлизуется, далее наносится слой второго лака (растворители у этих лаков должны быть различными, чтобы при нанесении второго слоя лака растворитель не мог бы разрушить ранее нанесенную пленку первого слоя лака); толщина каждого из слоев берется равной половине толщины пленки в описанном выше однослойном конденсаторе. В первом слое лака будут дефекты, полученные от металлизации, но во втором слое лака (который включен последовательно с первым) их уже не будет, что дает резкое

Рис. 261. Схемы устройства тонкопленочных конденсаторов с органическим диэлектриком: а — лакопленочный конденсатор с удаленной подложкой; б — лакопленочный конденсатор двухслойный с промежуточной металлизацией; в — лакопленочный конденсатор с сохраненной

экранированной непроводящей подложкой (неметаллической); г — лакофольговый конденсатор (лакопленочный с сохраненной проводящей подложкой); д — париленовый конденсатор (из фольги, покрытой слоем диэлектрика, полученным путем пиролиза).

1 — диэлектрик; 2 — тонкий слой металла; 3 — фольга; 4 — непроводящая подложка.

улучшение постоянной времени (рис. 262) и ее стабильности. Такие конденсаторы получили в СССР обозначение К76-2 (табл. 25); при тех же размерах, как у однослойных конденсаторов, двухслойные лакопленочные конденсаторы имеют номинальное напряжение 100 в; таким образом, при том же значении $C_{уд}$ величина удельного заряда у них повышена в 2 раза. При получении диэлектрика в этих конденсаторах использована комбинация из двух эфироцеллюлозных лаков: ацетилцеллюлозного и этилцеллюлозного.

В зарубежной практике для изготовления малогабаритных конденсаторов находит себе применение также тонкая пленка поликарбоната, для которой удастся получать толщину до 2 мм. При этом удельная емкость конденсатора может быть повышена до 2 мкф/см² при увеличенной стабильности емкости (по сравнению с конденсаторами, в которых использованы эфироцеллюлозные пленки), а также и с улучшенными другими электрическими свойствами. Такие конденсаторы, несомненно, имеют перспективу для дальнейшего распространения.

Лакопленочные конденсаторы с сохраненной подложкой были разработаны в лабораториях Белл (США) с использованием полистирольной пленки, которая имеет малую механическую прочность и не может быть снята с подложки при малых толщинах. Наличие подложки увеличивает объем этих конденсаторов по сравнению с описанным выше типом конденсатора с удаленной подложкой, но зато использование полистирола дает возможность получить малый $\operatorname{tg} \delta$, позволяющий в некоторых случаях осуществить замену слюдяных конденсаторов, имеющих еще больший объем. Для того чтобы исключить влияние большого $\operatorname{tg} \delta$ подложки (бумага, покрытая эфироцеллюлозным лаком) на общие потери конденсатора, перед нанесением слоя полистирольного лака применялась двухсторонняя металлизация подложки, после которой уже проводилась двухсторонняя лакировка полистирольным лаком. Конденсатор наматывается из двух таких лент (рис. 261, в). При этом подложка располагается между обкладками с одинаковым потенциалом, т. е. оказывается заэкранированной от действия электрического поля; рабочим диэлектриком являются два слоя полистирольной пленки, расположенные между обкладками различного знака.

Для уменьшения влияния размеров подложки на общий объем конденсатора было предложено наносить на одну и ту же подложку последовательно несколько слоев рабочего лака, проводя промежуточную металлизацию; но такое решение технологически

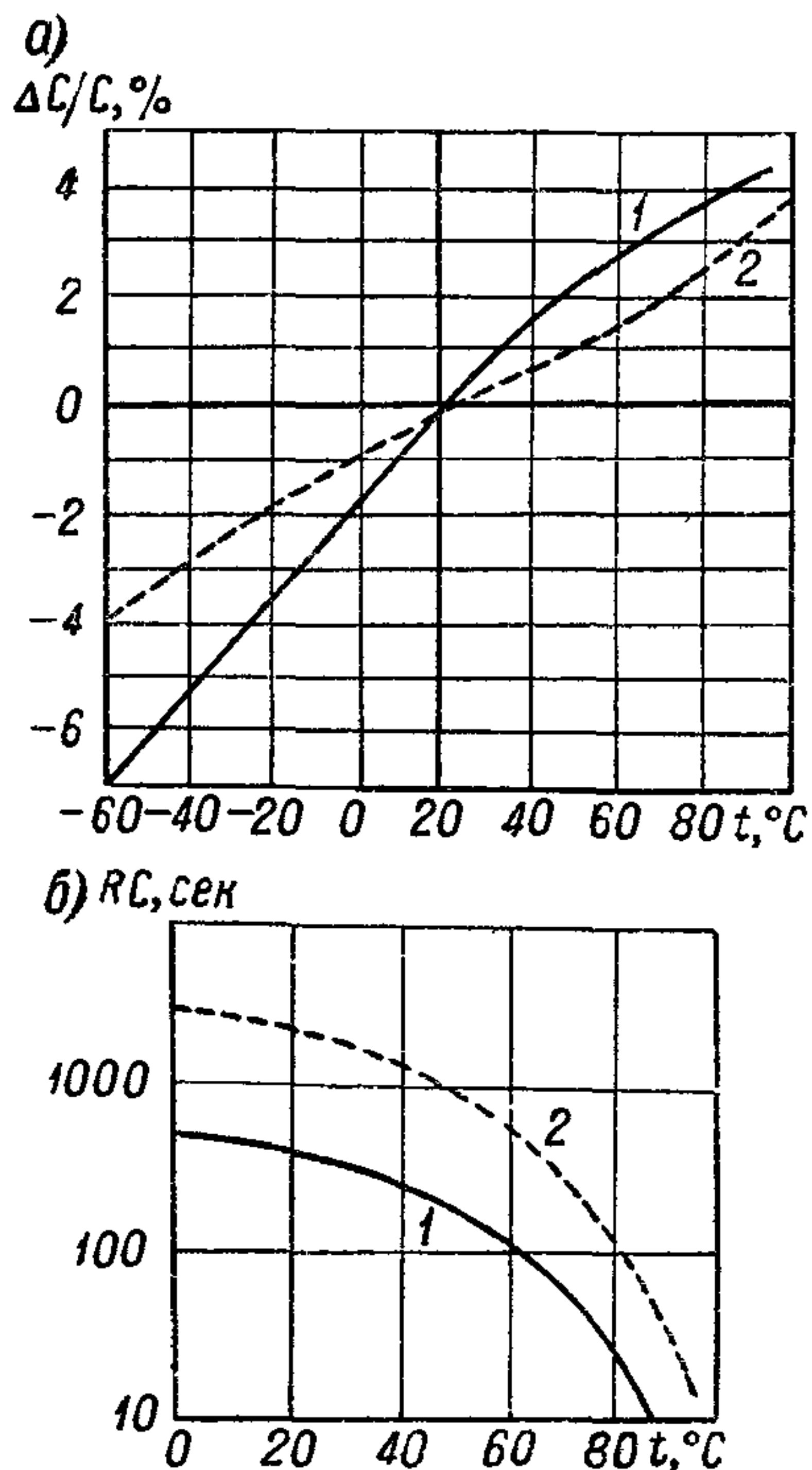


Рис. 262. Зависимость емкости (а) и постоянной времени (б) лакопленочных конденсаторов от температуры.

1 — однослойный; 2 — двухслойный с промежуточной металлизацией.

весьма сложно, так как требует чередования слоев различных лаков, чтобы растворитель последующего слоя не действовал на пленку предыдущего слоя. Поэтому такие многослойные системы не получили практического развития.

Некоторые зарубежные фирмы освоили в производстве несколько иной тип тонкослойного конденсатора — л а к о ф о л ь - г о в ы й (иногда его называли также металлолаковым — МЛ) (рис. 261, з). По существу это также конденсатор с сохраненной подложкой, но только в данном случае подложкой служит алюминиевая фольга, которая одновременно используется в качестве одной из обкладок конденсатора. В этом случае возникает известное затруднение с осуществлением вывода от обкладок, который в обычных лакопленочных конденсаторах, так же как и у металлобумажных, создается нанесением контактного металлического слоя на торцы секций с помощью напыления металла методом Шоопа (рис. 41). Поскольку торец фольги оказывается неизолированным при лакировке, то при контактировании торцов обычным методом у одного из них возникает опасность короткого замыкания фольговой и металлизированной обкладок.

В связи с этим было предложено после лакировки фольги производить химическое или электрохимическое вытравливание алюминия с одного края фольги на ширину 1—1,5 мм; при последующей металлизации закраина на поверхности лака оставлялась с того края фольги, где вытравливание не производилось. При этом торцовое нанесение контактного металла с левой стороны ленты (рис. 262, з) осуществляет контакт с металлизированной обкладкой, а с правой стороны — с фольговой обкладкой. Для лакировки фольги был использован п о л и у р е т а н о в ы й л а к под названием десмофен-десмодур; фольгу, покрытую этим лаком, поставляла конденсаторным заводам фирма Байер (ФРГ). Характеристики лакофольгового конденсатора приведены на рис. 263. По номинальным данным такие конденсаторы схожи с лакопленочными, но за счет объема фольги имеют увеличенный удельный объем; кроме того, технология вытравливания края фольги весьма кропотлива и сложна. Это приводит к тому, что лакофольговый конденсатор следует считать менее перспективным, чем лакопленочный.

Конденсатор с сохраненной фольговой подложкой может быть полезным в том случае, когда представится необходимость использовать какой-либо ценный по электрическим свойствам и нагревостойкости тонкослойный диэлектрик, который по механическим соображениям не может быть получен в виде свободной пленки с удаленной подложкой. Тонкие органические пленки могут быть получены не только лаковым способом, т. е. осаждением из раствора или из суспензии, но и иными методами. Так, м е т о д п и - р о л и з а был использован в США для получения пленки п о - л и п а р а к с и л и л е н а (парилена) (§ 82, табл. 23) термическим разложением параксилола с образованием пленки полимера

на фольге, пропускаемой через пиролитическую установку. Этим способом можно получать весьма тонкие однородные пленки. Для изготовления конденсаторов, по-видимому, применяли пленку толщиной 1 мкм, причем конденсаторы наматывали из двух лент фольги, изолированной этим способом (рис. 261, *д*), что увеличивало толщину диэлектрика между обкладками до 2 мкм. При этом за счет объема фольги удельный объем конденсатора был выше, чем для лакопленочных конденсаторов, тем более, что ε у париленовой пленки понижена. Однако высокая нагревостой-

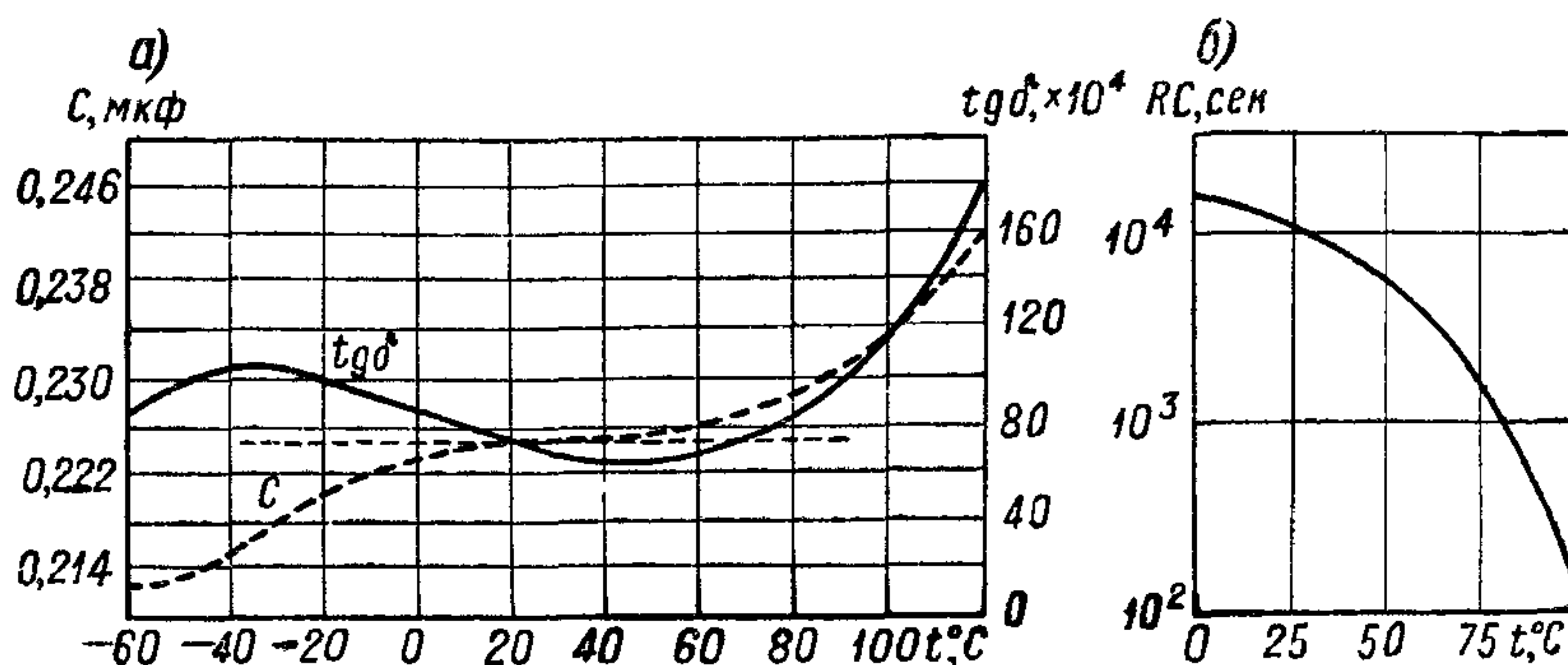


Рис. 263. Зависимость емкости и угла потерь (1 кГц) (а) и постоянной времени (б) лакофольговых конденсаторов от температуры (кривые относятся к конденсаторам, изготовленным по схеме рис. 261, *д*, но из лакированной фольги, поэтому RC выше, чем для конденсаторов по схеме рис. 261, *з*).

кость (170°C) и малые потери ($\text{tg } \delta \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$) позволяют сравнивать эти конденсаторы с конденсаторами из пленки ПТФЭ, имеющими большой объем. Для париленовых конденсаторов $\text{TKE} \approx -100 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ и $k_a < 0,1\%$. Вероятно, пленку полипараксилилена можно будет получать и в свободном виде; применяя металлизацию таких свободных пленок, можно будет изготавливать конденсаторы с малым удельным объемом.

Другим способом получения тонких органических пленок является метод полимеризации в газовой фазе, также позволяющий получать тонкие однородные пленки на фольге или металлизированной органической подложке. Этот метод еще не доведен до промышленного производства конденсаторов, но имеет известные перспективы при изготовлении микроминиатюрных конденсаторов намотанного типа.

§ 86. Конденсаторы с комбинированным диэлектриком

В настоящее время опробованы три типа конденсаторов с комбинированным диэлектриком:

- из полярной пленки и конденсаторной бумаги;
- из неполярной пленки и конденсаторной бумаги;
- из полярной и неполярной синтетических пленок.

В комбинированных конденсаторах из полярной пленки и бумаги оба компонента имеют величину $\operatorname{tg} \delta$ одного порядка, но $\rho_{об}$ у пленки много выше, чем у бумаги (не менее чем в 10 раз). Поэтому большая часть постоянного напряжения, подведенного к конденсатору, приходится на долю пленки, а бумага оказывается слабо нагруженной электрически и в основном играет только роль фитиля для всасывания пропиточной массы в зазоры между пленками, которые плохо смачиваются пропиточной массой. При этом $E_{пр}$ и $E_{ион}$ для комбинированного диэлектрика оказываются выше, чем для чисто пленочного (непропитанного) или чисто бумажного (пропитанного); диэлектрическая проницаемость комбинированного диэлектрика выше, чем у чисто пленочного, так как ϵ у бумаги выше, чем у обычных полярных пленок. Некоторое повышение суммарной величины ϵ и повышение $E_{раб}$ в соответствии с увеличением $E_{пр}$ позволяет повысить удельную энергию конденсатора с комбинированным диэлектриком; если сохранить то же $E_{раб}$, как в бумажных конденсаторах, то можно резко улучшить надежность, т. е. снизить интенсивность отказов λ ; так, в конденсаторах типа К75-12 с диэлектриком лавсан-бумага удалось получить $\lambda < 5 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$.

Ранее считали, что бумажную прокладку следует вводить только в зазоры между слоями пленки (рис. 264, а), так как в зазоры между пленкой и фольгой пропиточная масса будет втянута за счет смачиваемости фольги. Теперь показана полезность расположения бумажной прокладки и под фольговой обкладкой, особенно катодной. Можно полагать, что начало развития пробоя связано в данном случае с повышенной напряженностью поля у краев фольги, причем катодная фольга может служить источником электронов, инициирующих пробой. В этом случае наличие бумажной прокладки, имеющей резко увеличенную проводимость в сравнении с пленкой, дает выравнивание поля у края обкладки и этим способствует повышению электрической прочности. Поэтому обычно ставят бумажную прокладку и в зазор между фольгой и пленкой (рис. 264, б). На рис. 265 показано резкое увеличение тока утечки комбинированного конденсатора, в котором катодная фольга непосредственно прилегает к пленке, в сравнении с конденсатором, в котором фольговые обкладки отделены от пленки бумагой.

В комбинированных конденсаторах из неполярной синтетической пленки и конденсаторной бумаги компоненты имеют резко различные значения ϵ , $\rho_{об}$ и $\operatorname{tg} \delta$. Малая ϵ и высокое $\rho_{об}$ неполярных пленок обеспечивают как при постоянном, так и при переменном напряжении малую электрическую загрузку бумажных прокладок. Наличие последних дает повышение общего угла потерь конденсатора, однако, применяя рациональное соотношение толщин бумаги и пленки, можно получать такие значения $\operatorname{tg} \delta$, которые позволяют использовать конденсаторы подобного типа при средних значениях частот

порядка $10^3\text{--}10^4$ гц. Эти конденсаторы представляют интерес для использования в импульсных устройствах с повышенной частотой повторения импульса, где бумага в чистом виде или в комбинации с полярной пленкой имеет недостаточно малый $\text{tg } \delta$, а электрическую прочность надо повысить по сравнению с конденсатором

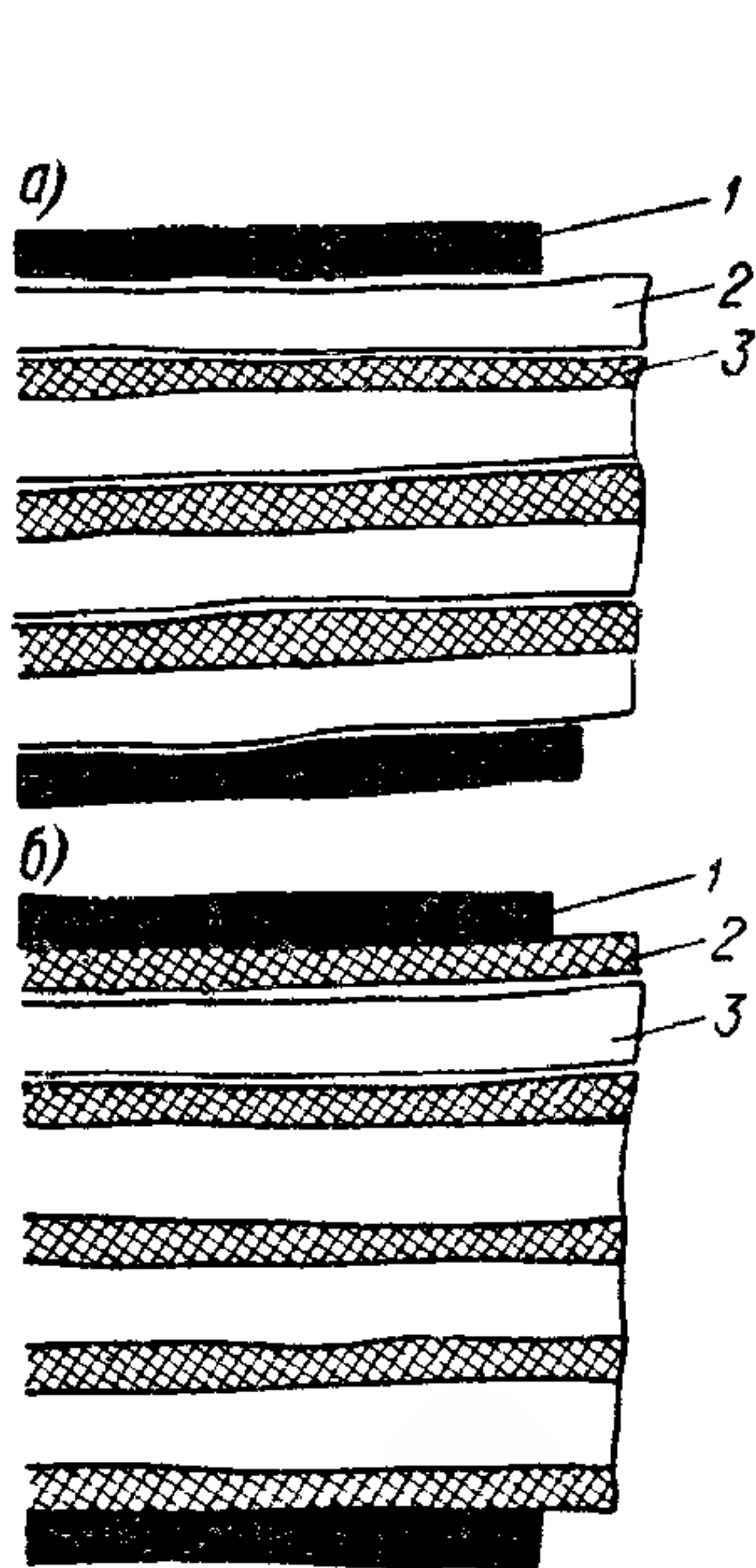


Рис. 264. Схема расположения слоев в конденсаторах с комбинированным пленочнобумажным диэлектриком: а — бумага только всасывает пропиточную жидкость в зазоры между пленками; б — бумага также способствует выравниванию поля у краев фольги.
1 — фольга; 2 — лента; 3 — бумага.

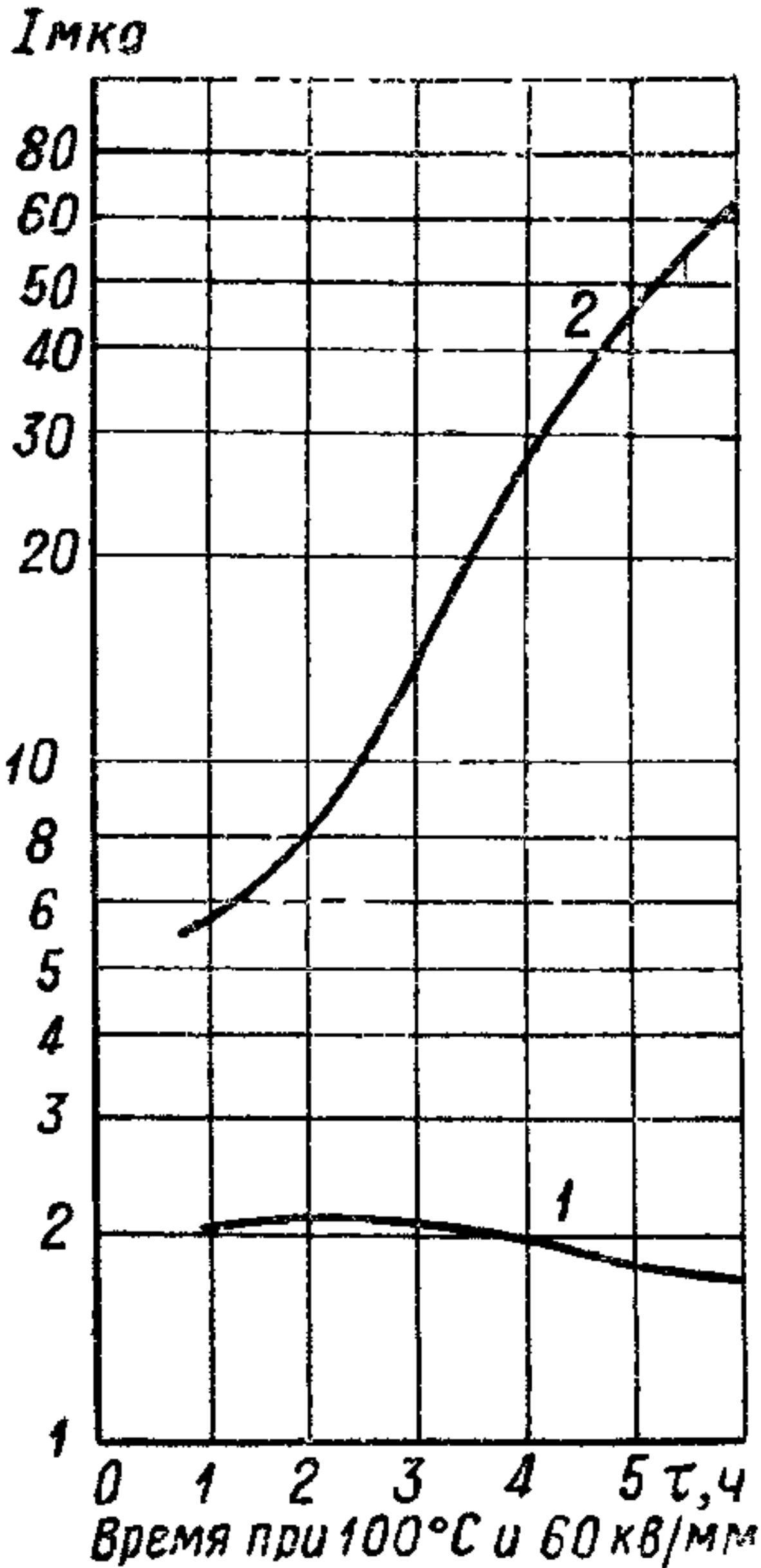


Рис. 265. Зависимость тока утечки от времени у комбинированных конденсаторов при повышенной температуре и высокой напряженности поля.
1 — к катодной фольге с двух сторон прилегает бумага; 2 — к катодной фольге с двух сторон прилегает синтетическая пленка.

из неполярной пленки. Эффективные значения ϵ и $\text{tg } \delta$ конденсатора с комбинированным диэлектриком можно вычислить, зная соответствующие величины этих характеристик для бумаги и для пленки и соотношение их толщин, используя простую эквивалентную последовательную схему (§ 28, § 76). Следует иметь в виду, что различный знак ТК ϵ бумаги и неполярной пленки способствует ослаблению температурной зависимости емкости комбинированного конденсатора. При использовании бумаги в комбинации с малонагревостойким полистиролом, общая нагревостойкость комбинированного конденсатора несколько повышается, так как бумага

удерживает размягченную пленку от деформации при повышенных температурах.

Примером конденсаторов с комбинированным диэлектриком из бумаги и пленки являются конденсаторы типов ПКГТ, ПКГ-И, К75-15 и др. (табл. 26). В некоторых случаях в комбинированных конденсаторах применяют металлизированную бумагу, что позволяет повысить $E_{\text{раб}}$ за счет проявления способности к самовосстановлению и улучшить удельные характеристики и надежность (тип К75-14). Однако при этом ухудшаются тепловые характеристики и при использовании такого диэлектрика при импульсном напряжении приходится ограничивать частоту повторения; при повышении частоты следования импульсов, как в конденсаторе типа К75И-7, приходится ограничивать $E_{\text{раб}}$ и снижать удельную энергию.

Выше уже отмечалось, что в США и Италии недавно проведены успешные опыты по разработке силовых конденсаторов с комбинированным диэлектриком для работы при частоте 50—60 гц. В сообщениях фирмы Дженерал Электрик (США)¹ указано, что выпуск конденсаторов нового типа «Слимвар» (с диэлектриком магнавар) начат в январе 1966 г. Конденсатор с номинальной мощностью 400 квар имеет размеры: $203 \times 254 \times 1320$ мм, что дает величину удельной мощности $400 : 68 = 5,85$ квар/л. Потери снижены в сравнении с бумажным конденсатором, пропитанным хлордифенилом, более чем в 2 раза и при температурах 10—50° С составляет 0,9—1%. Номинальное напряжение конденсаторов: 7,2; 7,64 и 7,96 кВ. Стоимость батареи из трех конденсаторов в сравнении с аналогичной батареей старых конденсаторов (12 штук по 100 квар) снижена на 25—30%. Сведений о типе пленки, использованной в комбинированном диэлектрике магнавар, не приводится, но судя по величине потерь, применена пленка неполярного типа.

В сообщении итальянской фирмы «Икар»,² которая впервые в Европе повторила этот американский опыт, указывается, что в качестве диэлектрика использована комбинация из изотактической полипропиленовой пленки и бумаги, пропитанной хлорированным дифенилом; толщины слоев подобраны с таким расчетом, что рабочая напряженность в пленке равна 40 кВ/мм, а в бумаге 16 кВ/мм. Величина потерь составляет 1%, т. е. того же порядка, как и в США, но, из осторожности, номинальная мощность доведена только до 150 квар, а удельная мощность по сравнению с бумажным конденсатором повышена лишь на 50% и составляет 3,5—4 квар/л. В связи с этим стоимость новых конденсаторов за 1 квар пока еще несколько выше, чем стоимость бумажных, хлордифениловых; однако следует учесть, что в связи с пониженными

¹ «Pole type power capacitor». — «Transmission and distribution», 1965, 17, № 12, p. 52.

² E. Giannini Mochi, D. Zanobetti, Isotactic polypropylene film for new power capacitor. CIGRE-CE-18, 1967/67/2.

Намотанные высоковольтные конденсаторы для электронной техники

Тип	Диэлектрик	$C_{ном}, мкф$	$U_{ном}, кВ$	Максимальный заряд		Максимальная энергия		$t_{макс}, ^\circ C$
				мкк	мкк/см ³	дж	дж/л	
КБГ-П	Бумага	0,01—10	2—30	30 000	6,2	225	9,6	70
К41-1	»	0,01—20	2,5—40	80 000	6,2	300	12,6	100
ПКГТ	Бумага + ПЭТФ или ПТФЭ	0,025—2	3—20	6 000	4,5	25	17,1	100
К75-15	Бумага + ПЭТФ	0,0051—10	3—50	30 000	13,2	156	90	100
ПКГ-И импульсный, 5 кГц	Бумага + ПТФЭ	0,001—2	1—50	3 000	3,8	32	3,6	100 *
К41И-7 импульсный, 15 кГц	Бумага (пропитанная ка- сторовым маслом)	50—100	5—10	500 000	285	2500	141	40
К75-9 импульсный, 100 кГц	Бумага + ПЭТФ	25—100	2	200 000	35	200	35	40
К75-14 импульсный, 1 кГц	Метализированная бу- мага + ПЭТФ	100	3	300 000	68	450	102	50
К75И-7 импульсный, 15 кГц	То же	25	2	50 000	38	50	38	40

* Допускается работа при 150°C, 50 % при $U = 0,5 \div 0,6 U_{ном}$.

См. также примечание к табл. 15.

потерями эксплуатационные расходы при использовании пленочнобумажных конденсаторов будут несколько снижены.

Комбинированные конденсаторы с диэлектриком из полярной и неполярной пленок выпускаются в США в качестве намотанных конденсаторов большой емкости, но с малым ТКЕ. Увеличение емкости одной из двух секций конденсатора, намотанной из полярной пленки, с положительным ТКЕ при нагревании компенсируется снижением емкости, намотанной из неполярной пленки с отрицательным ТКЕ. Обычно конденсатор наматывают сразу из двух параллельно включенных лент полярной и неполярной пленок, толщины которых подобраны так, чтобы получить емкости секций нужной величины [формула (36)]. На рис. 8 показана зависимость емкости от температуры для комбинированного полистирольномайларового (ПЭТФ) конденсатора и для составляющих его секций. Аналогичные данные были получены также при использовании комбинации из полиэтиленовой и триацетатной пленки. С появлением поликарбонатной пленки, позволяющей изготавливать намотанные конденсаторы достаточно большой емкости с малым значением ТКЕ в широком интервале температур, комбинированные пленочные термокомпенсированные конденсаторы в значительной степени теряют интерес в тех случаях, когда требуется конденсатор большой емкости с малым ТКЕ.

Дополнительные сведения о пленочных конденсаторах разных типов можно найти в книге автора: «Пленочные конденсаторы с органическим диэлектриком» (ГЭИ, 1963 г.).

Глава XIII

ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ (ОКСИДНЫЕ) КОНДЕНСАТОРЫ

§ 87. Общая характеристика

Электролитический конденсатор представляет собой особый тип конденсатора, в котором в качестве диэлектрика используется тонкий слой оксида вентильного металла, образованный на поверхности этого металла электролитическим путем за счет выделения кислорода у металлической поверхности, к которой прикладывается положительный потенциал. Толщина слоя оксида зависит от величины напряжения, прикладываемого к металлу в процессе создания оксидного слоя (процесса *формовки*):

$$d = aU_{\phi}, \quad (281)$$

где U_{ϕ} — формовочное напряжение в в, d — толщина оксидного слоя в Å, a — коэффициент, зависящий от рода вентильного металла и представляющий собой относительную толщину оксидного слоя в Å/в (табл. 27).

При небольших напряжениях оксидный слой имеет очень малую толщину, порядка долей микрона. При этом, в отличие от других рассмотренных выше способов получения тонких слоев неорганических диэлектриков (§ 74), создание тонких оксидных слоев на вентильных металлах технологически просто и может быть осуществлено на большой поверхности металла, что облегчает получение больших емкостей. Сочетание малой толщины диэлектрика с относительно большой ϵ , порядка 10—100, и большой площадью обкладок позволяет изготавливать электролитические конденсаторы с рекордными значениями номинальной емкости, достигающими десятков тысяч и даже сотен тысяч микрофарад при малых напряжениях (порядка нескольких вольт); при этом удельная емкость конденсатора может достигать нескольких сотен микрофарад на 1 см^2 , а удельный заряд — нескольких тысяч микрокулонов на 1 см^2 .

Верхняя граница рабочего напряжения электролитических конденсаторов не превышает 450—500 в, и их основные преимущества реализуются при небольших напряжениях, порядка десятков вольт и ниже, где они не имеют конкурентов по удельным характеристикам. Поэтому в настоящее время, когда появление полупроводниковых приборов (транзисторов) позволило резко снизить напряжение в электронной аппаратуре по сравнению с прежней, работающей на вакуумных радиолампах, электролитические конденсаторы приобрели особенно большое значение. Это вызвало быстрый прогресс в указанной области конденсаторостроения и способствовало резким изменениям в конструкции, технологии и свойствах электролитических конденсаторов.

Одной из обкладок электролитического конденсатора является вентильный металл, на котором создан оксидный слой. В качестве второй обкладки ранее считалось обязательным использование электролита в жидкой или пастообразной форме. Только для системы вентильный металл — оксидный слой — электролит считалось возможным получить высокую электрическую прочность; при анодном включении вентильного металла можно было обеспечивать $E_{\text{раб}}$ до 400—500 кВ/мм, что значительно превышает кратковременные значения $E_{\text{пр}}$ для большинства других типов диэлектриков. Вместе с тем, при изменении полярности напряжения электрическая прочность резко падала и при катодном включении обычный электролитический конденсатор пропускал большой ток. Таким образом, приходилось считать, что для оксидного слоя характерна у н и п о л я р н а я п р о в о д и м о с т ь и что электролитический конденсатор является п о л я р н ы м конденсатором. Резкое изменение проводимости оксидного слоя при изменении полярности напряжения позволяло получать эффект выпрямления для системы вентильный металл — оксид — электролит, поэтому ранее такая система использовалась в электролитических выпрямителях (вентильях). Отсюда те металлы, на которых можно создавать оксидный слой с унипо-

лярной проводимостью, получили название **вентильных металлов**.

Наличие в конденсаторе электролита вызывает ряд неприятных особенностей в свойствах электролитического конденсатора, связанных с тем, что сопротивление одной из обкладок оказывается резко увеличенным. В связи с этим электролитический конденсатор в первом приближении можно представить в виде последовательной эквивалентной схемы, составленной из емкости оксидного слоя $C_{\text{окс}}$ и сопротивления электролита $r_{\text{эл}}$ (рис. 266). В этом случае мы можем ожидать высо-

ких значений тангенса угла потерь, который согласно выражению (102) будет равен:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_{\text{окс}} r_{\text{эл}}. \quad (282)$$

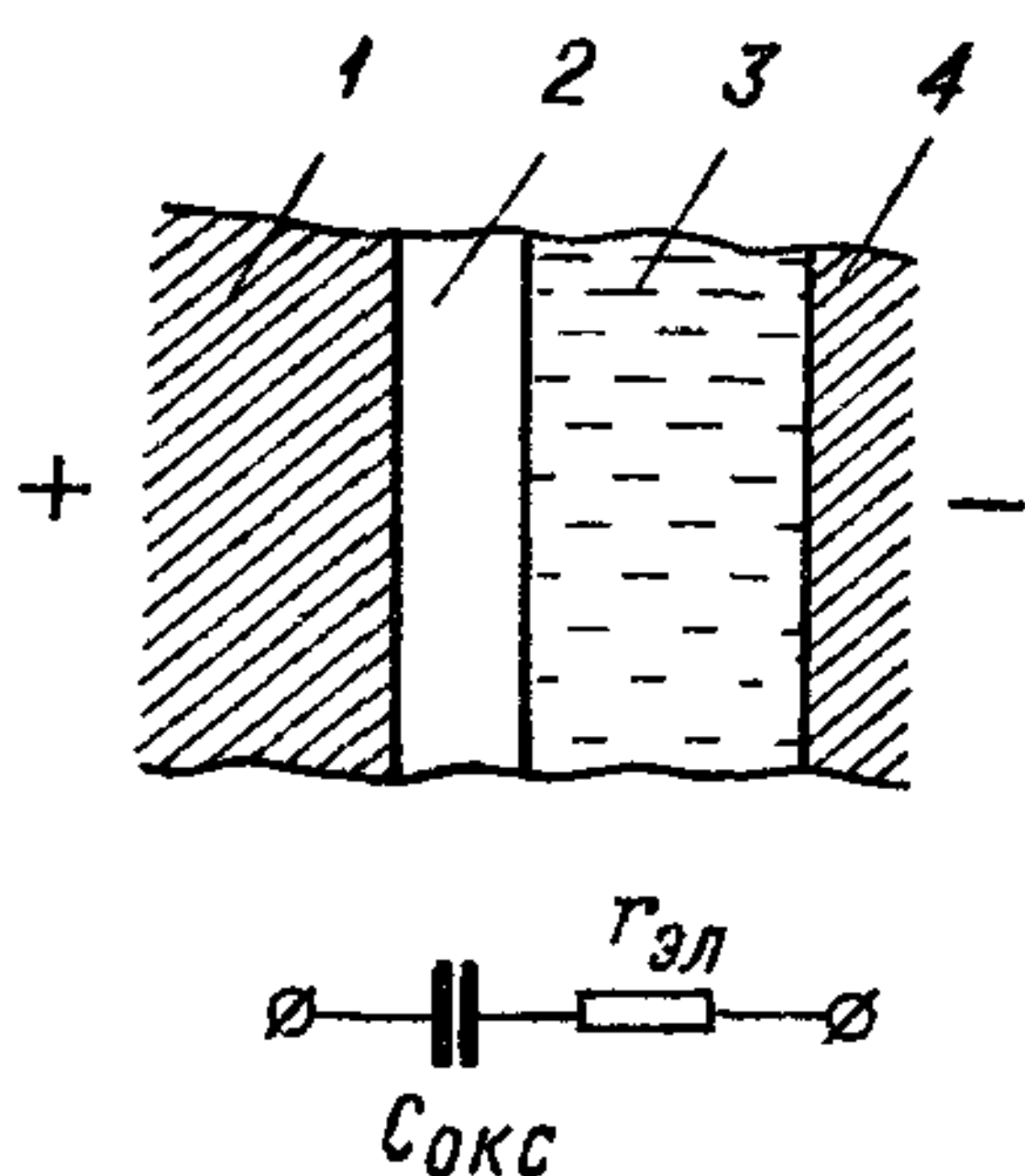


Рис. 266. Схема электролитического конденсатора.

1 — вентильный металл (анод); 2 — слой оксида; 3 — электролит (катод); 4 — металл (катодный вывод).

Даже при частоте 50 гц и температуре 20° С для ряда типов электролитических конденсаторов $\operatorname{tg} \delta$ доходит до 0,1—0,2 (т. е. до $1000 \div 2000 \cdot 10^{-4}$); с повышением частоты он должен возрастать практически линейно. Высокий угол потерь делал электролитические конденсаторы пригодными лишь для работы при постоянном или пульсирующем напряжении, даже не зависимо от того, что приходилось еще учитывать их полярность.

Наличие большого последовательно включенного сопротивления $r_{\text{эл}}$ должно снижать величину эффективной емкости электролитического конденсатора по отношению к фактической емкости оксидного слоя согласно выражениям (105) и (283):

$$C_{\text{эфф}} = \frac{C_{\text{окс}}}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} = \frac{C_{\text{окс}}}{1 + \omega^2 C_{\text{окс}}^2 r_{\text{эл}}^2}. \quad (283)$$

Поэтому, если в обычных типах конденсаторов с малым сопротивлением обкладок мы можем заметить снижение емкости с частотой только в верхней области радиочастот, то для электролитических конденсаторов уже в области звуковых частот емкость заметно снижается (рис. 33). При снижении температуры сопротивление электролита начинает резко возрастать; это влечет за собой резкое возрастание $\operatorname{tg} \delta$ и снижение эффективной емкости, согласно выражению (283) (рис. 267). В связи с этим для электролитических конденсаторов критичным является нижний предел рабочей температуры, определяемый резким падением емкости; для обычных электролитических конденсаторов при $t_{\text{мин}}$ гарантируется емкость не ниже 50% от ее значения при 20° С. Получение электролитических конденсаторов с $t_{\text{мин}} = -60^\circ \text{С}$ потребовало в свое время

больших усилий; эта задача была решена в СССР раньше, чем за рубежом.

Таким образом, отличаясь высокими значениями удельной емкости на единицу объема и веса и возможностью получения исключительно высоких значений $C_{\text{ном}}$, при небольших напряжениях электролитические конденсаторы требовали соблюдения определенной полярности при их включении в цепь постоянного тока (см. рис. 1, в), имели резко увеличенный угол потерь (см. табл. 2) и малоудовлетворительные температурно-частотные характеристики; стабильность емкости во времени была также недостаточно удовлетворительной, а допуск по емкости значительно превышал

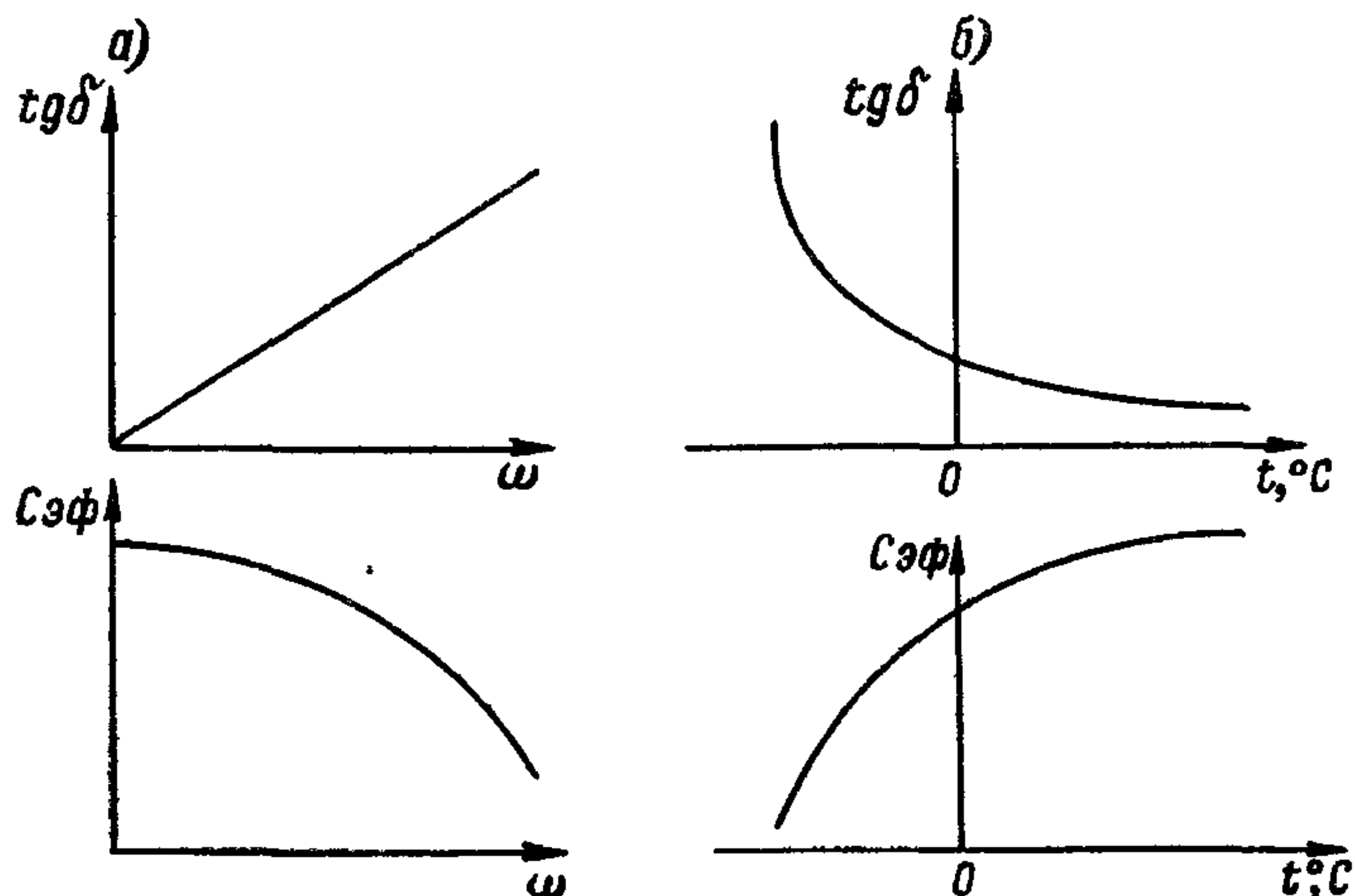


Рис. 267. Общий характер зависимости емкости и угла потерь от частоты (а) и от температуры (б) для электролитического конденсатора.

величины, принятые для других типов конденсаторов (обычно $-50 \div +100\%$); ток утечки был велик и постоянная времени обычно не превышала 10 сек. Расширение применения электролитических конденсаторов в аппаратуре с полупроводниковыми приборами потребовало повышения их качества и приближения уровня их электрических свойств и температурного интервала работы к другим типам конденсаторов с твердым диэлектриком. Эта задача была решена по линии расширения номенклатуры применяемых в конденсаторостроении ventильных металлов и по линии усовершенствования конструкции конденсаторов, а также и технологии их производства.

Ранее основным типом ventильного металла, применяемого при изготовлении электролитических конденсаторов, являлся только алюминий. До сего времени он широко применяется для наиболее массовых типов конденсаторов, но наряду с ним начато применение и других ventильных металлов: тантала, ниобия и титана. Сравнение некоторых свойств этих металлов и их

оксидов представлено дано в табл. 27. Применяемые металлы резко различаются по температуре плавления и плотности, а также по величине ϵ своих оксидов. Дополнительные сведения об особенностях вентильных металлов будут даны ниже, при рассмотрении отдельных типов конденсаторов. В табл. 27 введены также данные о цирконии; этот металл подвергался исследованию как пригодный, в принципе, для изготовления электролитических конденсаторов, но пока не нашел еще промышленного применения. Кроме него, отдельные опыты проводились также с сурьмой, висмутом, вольфрамом и некоторыми другими металлами, но пока еще не дали интересных результатов. По последним данным, в США с успехом опробуется гафний, позволяющий поднять рабочую температуру конденсатора до 400°C ¹.

Таблица 27

Некоторые характеристики вентильных металлов и их оксидов, применяемых в конденсаторостроении

Металл	$t_{\text{пл}}, ^{\circ}\text{C}$	$\gamma, \text{г/см}^3$	$\sigma_p, \text{кг/см}^2$	Оксид	ϵ	$\text{ТКЕ} \cdot 10^6, \text{град}^{-1}$	Коэффициент α (рис. 281) А/в
Тантал	2980	16,6	35—50	Ta_2O_5	27	+250	15—17
Ниобий	2410	8,6	30—45	Nb_2O_5	45	+(850 ÷ 1200))	20—24
Цирконий	1860	6,5	30—45	ZrO_2	23	+310	28—30
Титан	1670	4,5	50—55	TiO_2	107	+(300 ÷ 400)	30
Гафний	—	13,07	—	HfO_2	40	—	55
Алюминий	660	2,7	5	Al_2O_3	10	+(330 ÷ 440)	14

В отношении конструкции электролитического конденсатора надо обратить внимание, прежде всего, на тип второй обкладки — катода. В первых конденсаторах в качестве второй обкладки использовался жидкий электролит в виде водного раствора слабых кислот и щелочей (жидкостный конденсатор — рис. 268, а). Недостатком алюминиевых жидкостных конденсаторов являлась относительная сложность конструкции, связанная с использованием жидкости внутри конденсатора, низкая морозостойкость (около 0°C), большой угол потерь (вызванный относительно большой длиной пути тока от анода до катода); преимуществом являлось свойство самовосстановления при пробое от случайного кратковременного перенапряжения (после возвращения конденсатора к нормальному режиму быстро происходила «заформовка», т. е. восстановление слоя оксида в поврежденном месте диэлектрика).

Значительное упрощение конструкции было достигнуто при замене жидкого электролита вязким пастообразным электролитом,

¹ Trans. 3 Internat. Vacuum Congr., Stuttgart, 1965, vol. 2, pt. 2, p. 359—361 (издано в 1967 г.).

которым пропитывалась волокнистая прокладка (бумага, ткань), разделяющая анодную оксидированную фольгу и неоксидирован-

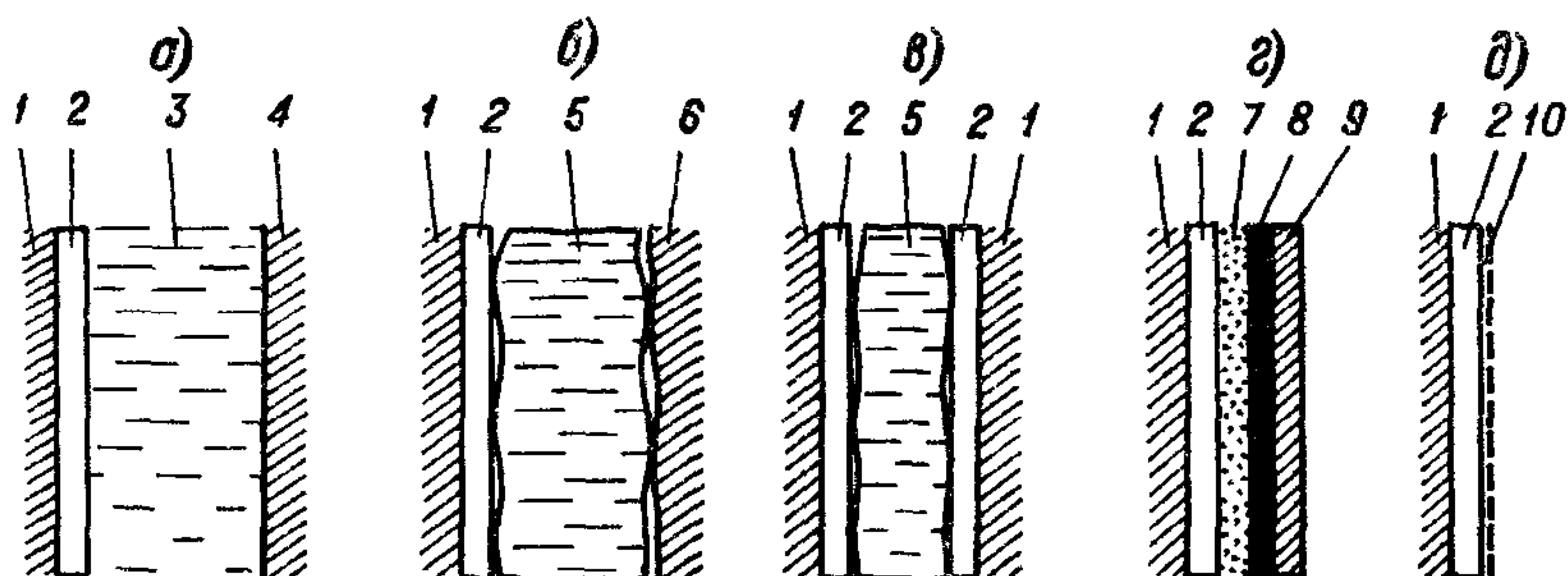


Рис. 268. Схемы конструкции основных типов электролитических конденсаторов: а — жидкостный; б — сухой; в — сухой неполярный; г — твердый (оксидно-полупроводниковый); д — оксидно-металлический.

1 — вентильный металл (анод); 2 — оксидный слой; 3 — жидкий электролит; 4 — металлический корпус (катод); 5 — вязкий электролит в волокнистой прокладке; 6 — катодная фольга; 7 — слой полупроводника; 8 — слой графита; 9 — слой металла, нанесенный напылением; 10 — тонкий слой металла, нанесенный испарением.

ную «катодную» фольгу, служащую выводом от электролита (с у - х о й к о н д е н с а т о р — рис. 268, б). Сближение анода и катода уменьшило путь тока через электролит, что привело к уменьшению угла потерь и улучшению температурно-частотных характеристик; морозостойкость была резко улучшена при замене воды органическими растворителями типа глицерина или этиленгликоля; улучшилась также и стабильность характеристик конденсатора во времени. Эти преимущества привели к быстрому вытеснению из практики жидкостного алюминиевого конденсатора сухим конденсатором, хотя способность к самовосстановлению при этом ухудшилась. Сравнение схемы конструкции жидкостного и сухого алюминиевых конденсаторов дано на рис. 269. Несмотря на некоторое улучшение характеристик, сухой алюминиевый конденсатор еще обладал резко пониженным качеством по сравнению с бумажным конденсатором.

Применение т а н т а л а позволило использовать более агрессивные электролиты с меньшим удельным сопротивлением благодаря большей химической устойчивости Ta_2O_5 ; снижение величины $r_{эл}$ улучшило температурно-частотные характеристики и несколько

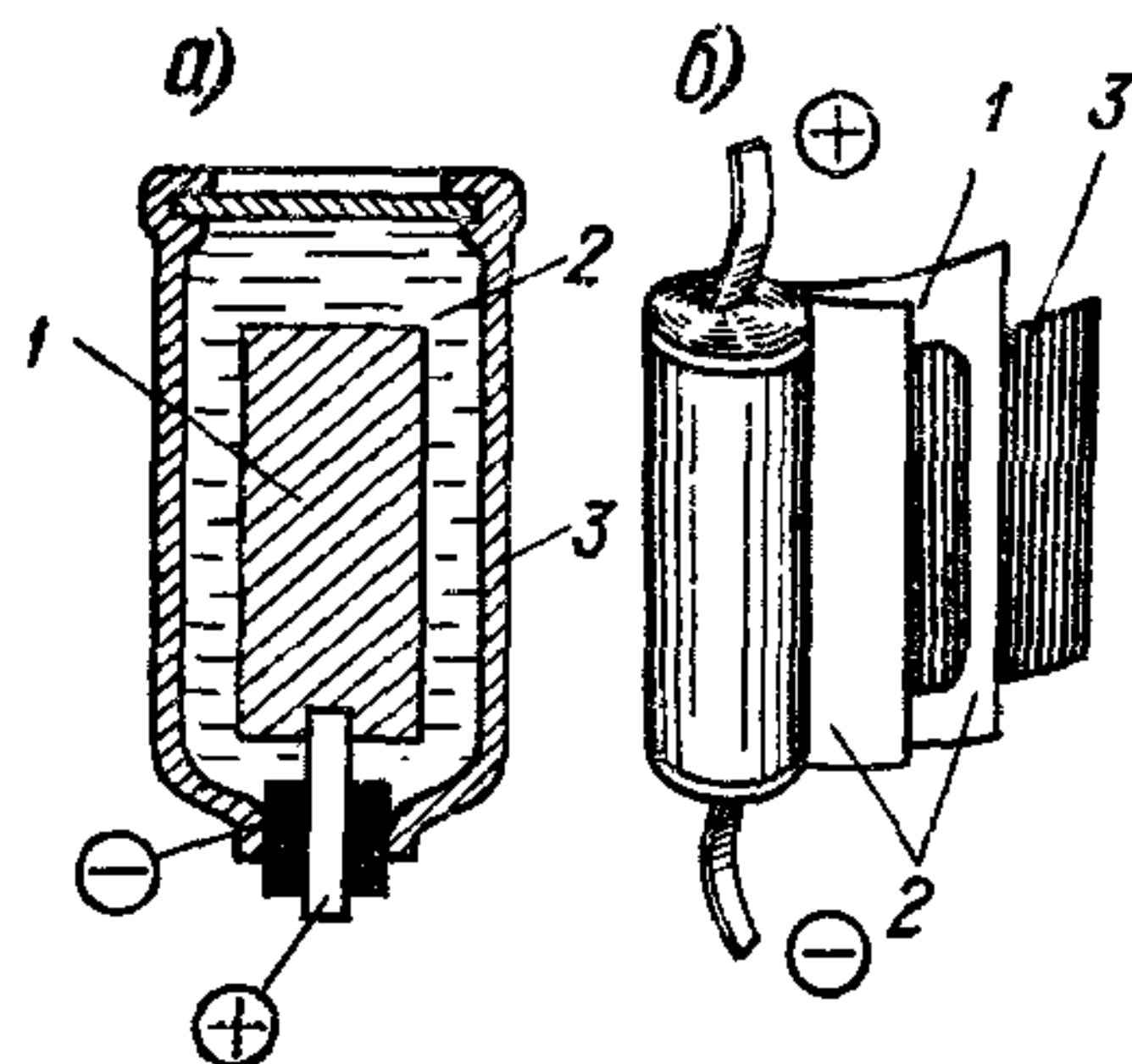


Рис. 269. Сравнение схемы конструкции жидкостного (а) и сухого (б) конденсаторов.

1 — анод (оксидированный металл); 2 — электролит (в жидком виде или впитанный в прокладку); 3 — катод.

снизило $\operatorname{tg} \delta$, но все же не дало принципиального изменения свойств, присущих электролитическому конденсатору. Наряду с фольговыми танталовыми конденсаторами сухого типа оказалось целесообразным использовать также и жидкостные конденсаторы, которые при алюминиевых анодах уже вышли из употребления. Танталовые жидкостные конденсаторы позволили резко снизить токи утечки и расширить температурный интервал до $-60 \div +(150-200)^\circ \text{C}$.

При использовании электролита в качестве второй обкладки униполярную проводимость системы металл — оксид — электролит можно было упрощенно объяснить различным характером носителей тока в двух обкладках электролитического конденсатора: в вентильном металле — электроны, в электролите — ионы. При анодном включении, когда на вентильный металл подан «плюс», ионы из электролита стремятся пройти к аноду, но встречают барьер в виде оксидного слоя, который для них оказывает большое сопротивление, поэтому ток утечки мал. При катодном включении, когда «плюс» подан на электролит, а на вентильный металл — «минус», электроны из металла легко проходят через оксидный слой и ток резко возрастает.

При встречно-последовательном соединении двух одинаковых полярных электролитических конденсаторов (соединяя у них по одному выводу одинакового знака), можно было получить неполярную систему, не чувствительную к изменению полярности напряжения. Эту же идею оказалось возможным реализовать для изготовления неполярных электролитических конденсаторов, выполненных из двух оксидированных лент вентильного металла, разделенных волокнистой прокладкой, пропитанной электролитом (рис. 268, в). Такой конденсатор в принципе, казалось бы, можно использовать при переменном напряжении, так как при положительной волне напряжения работает оксидный слой на одном аноде, а при отрицательной — на втором аноде, что обеспечивает малый ток утечки при любой полярности приложенного напряжения; однако большой угол потерь неизбежно привел бы такой конденсатор к недопустимому перегреву при переменном напряжении. Поэтому неполярные электролитические конденсаторы можно использовать лишь при постоянном напряжении, когда возможна смена полярности, или для кратковременного включения под переменное напряжение, например при пуске конденсаторных электродвигателей (рис. 27, емкость C_2).

Качественное изменение характеристик электролитического конденсатора было получено при замене электролита твердым полупроводником (рис. 268, г). Сначала возможность такой замены была показана для танталовых конденсаторов, но теперь эту идею используют и для других вентильных металлов. Конденсаторы с таким типом катода получили название оксидно-полупроводниковых (ОП) конденсаторов. Замена

электролита полупроводником не только снижает величину сопротивления $r_{эл}$, включенного последовательно с емкостью оксидного слоя, но и меняет характер его зависимости от температуры, так как вместо ионной электропроводности электролита (резко падающей при его замерзании) мы используем электронную проводимость полупроводника. В связи с этим для ОП-конденсатора в области низких температур угол потерь мало изменяется с температурой, а емкость снижается почти линейно, с величиной ТКЕ, приближающейся к ТКЕ для оксидного слоя (рис. 270). Это позволяет использовать ОП-конденсаторы даже до -80°C . Заметно ослабляются и частотная зависимость емкости, и $\text{tg } \delta$. Современные ОП-конденсаторы по своим характеристикам приближаются к бумажным конденсаторам или к конденсаторам из полярных пленок и, в ряде случаев, могут их заменять. В связи с этим конденсаторы ОП-типа изготавливают не только с большими значениями $C_{ном}$, но и с малыми, характерными для бумажных и пленочных конденсаторов (порядка долей микрофарады, см. табл. 28, ниже).

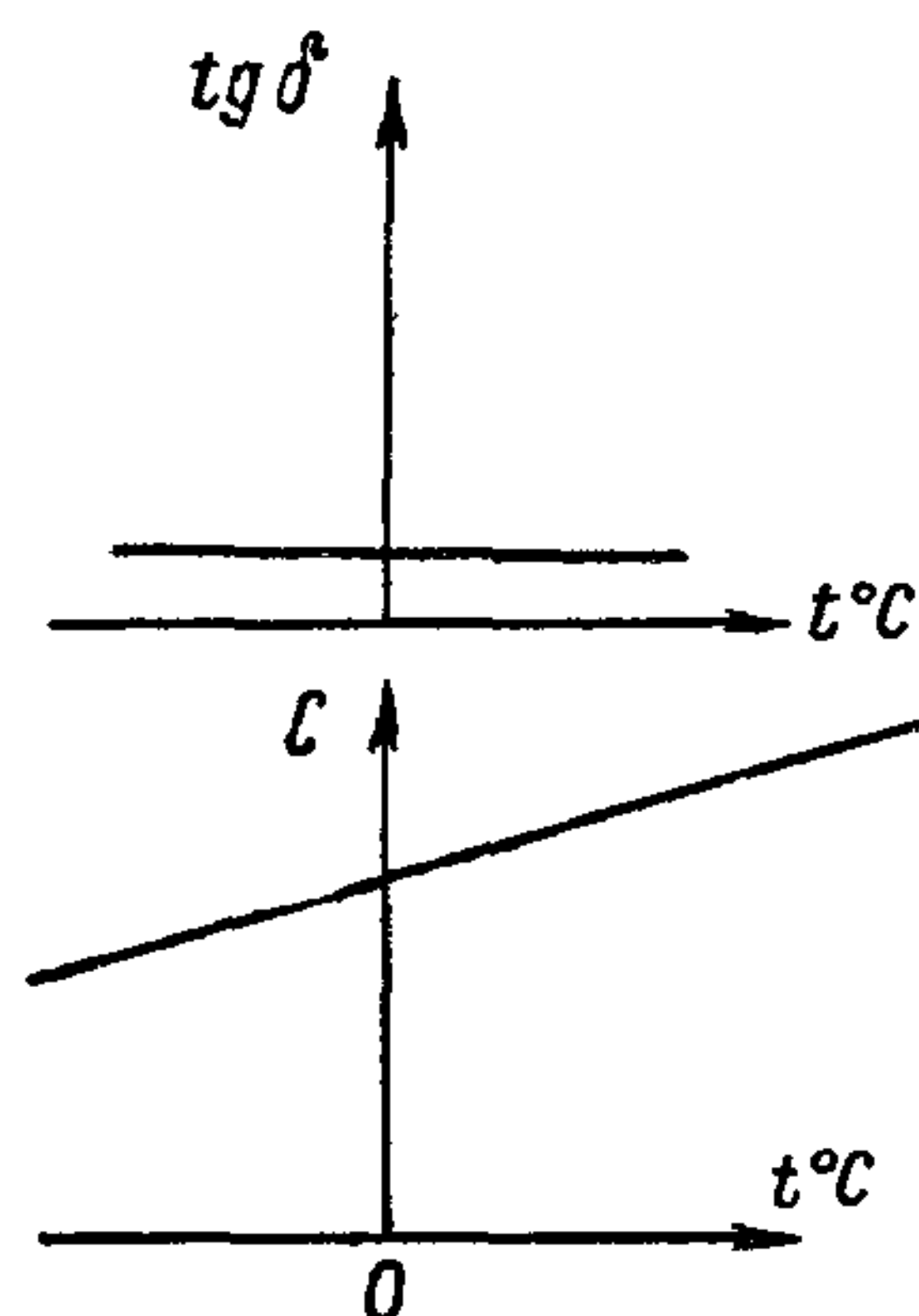


Рис. 270. Общий характер зависимости емкости и угла потерь оксидно-полупроводникового («твердого») конденсатора от температуры.

Хотя в оксидно-полупроводниковых конденсаторах униполярный эффект проявляется слабее, чем в обычных электролитических, но все же он существует, и его уже нельзя объяснить различием в характере носителей тока, как это мы сделали для обычных

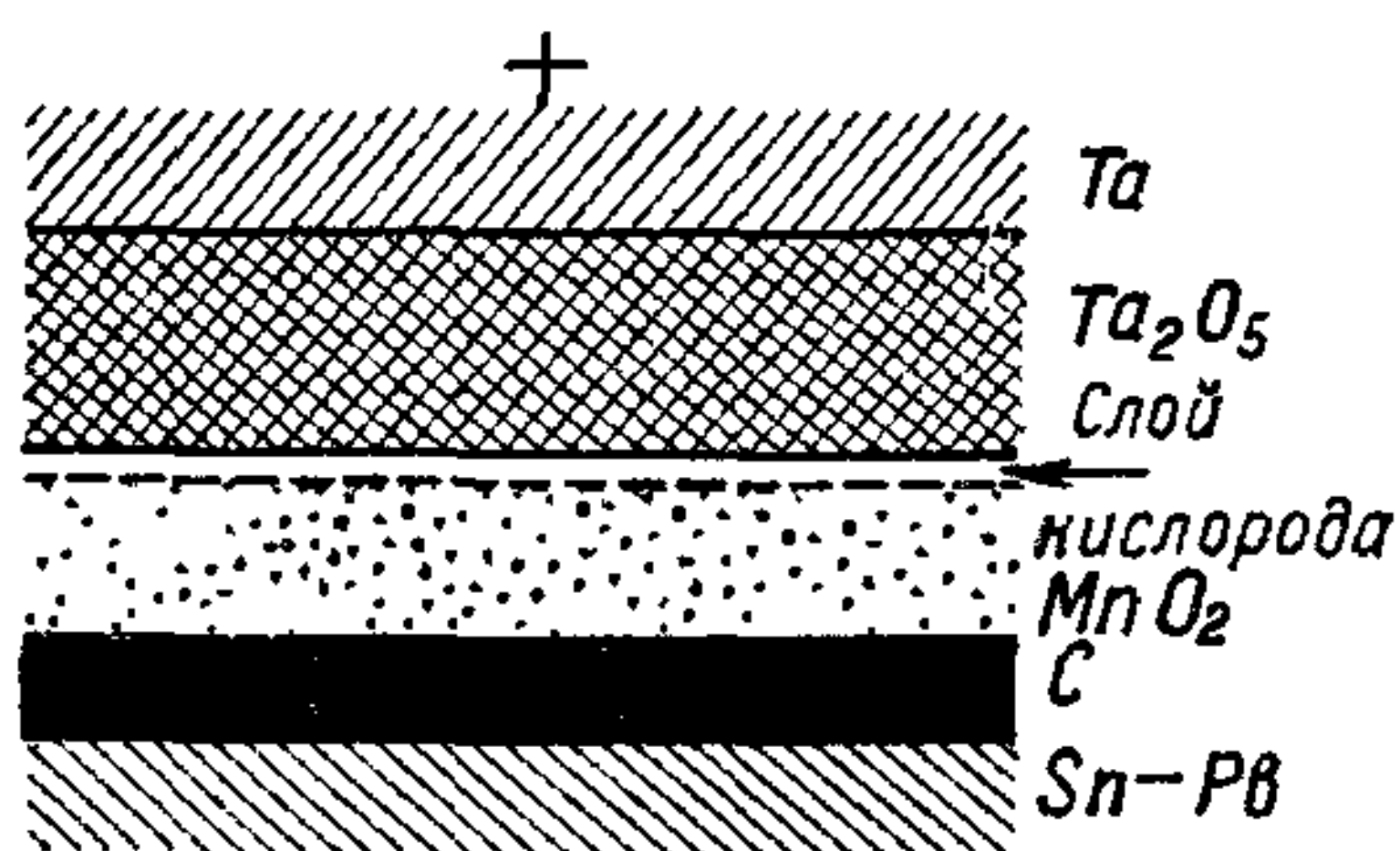


Рис. 271. Схема расположения слоев в танталовом оксидно-полупроводниковом конденсаторе.

электролитических конденсаторов выше. По предположению Тэйлора и Хэринга, предложивших впервые этот тип конденсатора, между слоями окиси тантала и окиси марганца (электронного полупроводника) имеется тонкий переходный слой кислорода (дырочный полупроводник), образованный за счет восстановления окиси марганца (рис. 271). На границе между полупроводящими слоями с электронной и дырочной проводимостью возникает запирающий слой с повышенным сопротивлением,

как в твердых полупроводниковых выпрямителях.

Если на тантал подан положительный потенциал, а на MnO_2 — отрицательный, то электроны и «дырки» отсасываются из запирающего слоя, он расширяется и сопротивление его возрастает, обеспечивая снижение тока утечки через конденсатор. Если на тантал подан

отрицательный потенциал, то количество носителей тока обоих знаков в запорном слое увеличивается, он сужается, сопротивление его падает и система пропускает большой ток.

Недостатком ОП-конденсаторов является резкое ухудшение способности к самовосстановлению, характерной для обычных электролитических конденсаторов, особенно жидкостных. Поэтому при равных значениях рабочего напряжения приходится увеличивать толщину оксидного слоя, увеличивая напряжение его формовки. Это снижает удельную емкость и удельный заряд ОП-конденсаторов и ограничивает, дополнительно, верхний предел рабочего напряжения. Для увеличения надежности ОП-конденсаторов приходится требовать, чтобы при их использовании полное сопротивление участка схемы, в которой применяется конденсатор, было бы достаточно велико, не менее 3 ом/в . Несмотря на такие недостатки ОП-конденсаторы находят себе все расширяющееся применение.

Следующим шагом в совершенствовании характеристик электролитического конденсатора явилась замена полупроводника второй, м е т а л л и ч е с к о й, обкладкой (рис. 268, *д*). Конденсаторы такого типа получили название о к с и д н о м е т а л л и ч е с к и х. Попытки применения второй металлической обкладки в алюминиевых конденсаторах приводили к короткому замыканию, что можно было объяснить большим количеством дефектов в слое оксида алюминия. При использовании электролита эти дефекты могли «залечиваться» дополнительным созданием оксидного слоя в дефектном участке за счет выделения кислорода из электролита; в меньшей степени можно ожидать выделения некоторого количества кислорода и из полупроводника типа двуокиси марганца; при второй металлической обкладке эта возможность отпадает. Однако в танталовом конденсаторе благодаря большей однородности слоя окиси тантала и малому числу дефектов в оксидном слое удалось избежать неизбежного короткого замыкания обкладок, применив вторую металлическую обкладку малой толщины, нанесенную испарением в вакууме. В этом случае, так же как в металlobумажном конденсаторе, при наличии случайного сквозного дефекта в оксидной пленке ток короткого замыкания удаляет тонкий слой металла вокруг дефекта, изолируя его от обкладки (см. рис. 48). Все же, даже в случае использования тантала, изготавливать конденсаторы такого типа с большой площадью обкладок не представляется возможным, так как возрастает вероятность появления таких дефектов, которые не дают проявиться эффекту самовосстановления; поэтому оксиднометаллические конденсаторы применяют в виде малогабаритных конденсаторов с емкостью порядка десятков или сотен тысяч пикофарад в плоских схемах или в микромодулях. Характеристики таких конденсаторов целиком определяются свойствами оксида. Эффект униполярности в оксиднометаллических конденсаторах проявляется очень слабо, а иногда практически отсутствует.

Таким образом, современные электролитические конденсаторы по основам их конструкции можно делить на жидкостные, сухие, твердые (оксиднополупроводниковые) и оксиднометаллические. Два последних типа не содержат электролита, а потому их часто называют уже не электролитическими, а оксидными, распространяя иногда это название и на первые два типа. По существу название электролитические можно сохранить и для оксиднополупроводниковых и оксиднометаллических конденсаторов, поскольку электролит все же участвует в процессе создания оксидного слоя на вентильном металле, хотя и не входит в состав готового конденсатора. По типу вентильного металла можно рассматривать алюминиевые, танталовые, ниобиевые и титановые конденсаторы. Этого разделения мы и придерживаемся ниже.

§ 88. Алюминиевые электролитические конденсаторы

Основным типом алюминиевого конденсатора является сухой конденсатор, секции которого изготавливаются намоткой из оксидированной анодной алюминиевой фольги, волокнистой прокладки (обычно бумажной) и неоксидированной катодной алюминиевой фольги и обычно пропитываются рабочим электролитом уже после намотки. Фактически катодом является бумага, пропитанная электролитом, а катодная фольга служит только выводом от проводящей бумажной прокладки. Пропитанная электролитом секция (рис. 269, б) помещается в алюминиевый цилиндрический корпус, к которому присоединяется катодный вывод; анодный вывод присоединяется к лепестку, укрепленному на изоляционной крышке; крышка крепится в корпусе путем закатки (рис. 272). Реже применяется изоляционный корпус (например из полиуретана); в этом случае конденсатор имеет два изолированных вывода, и анодный вывод должен быть обозначен знаком «плюс».

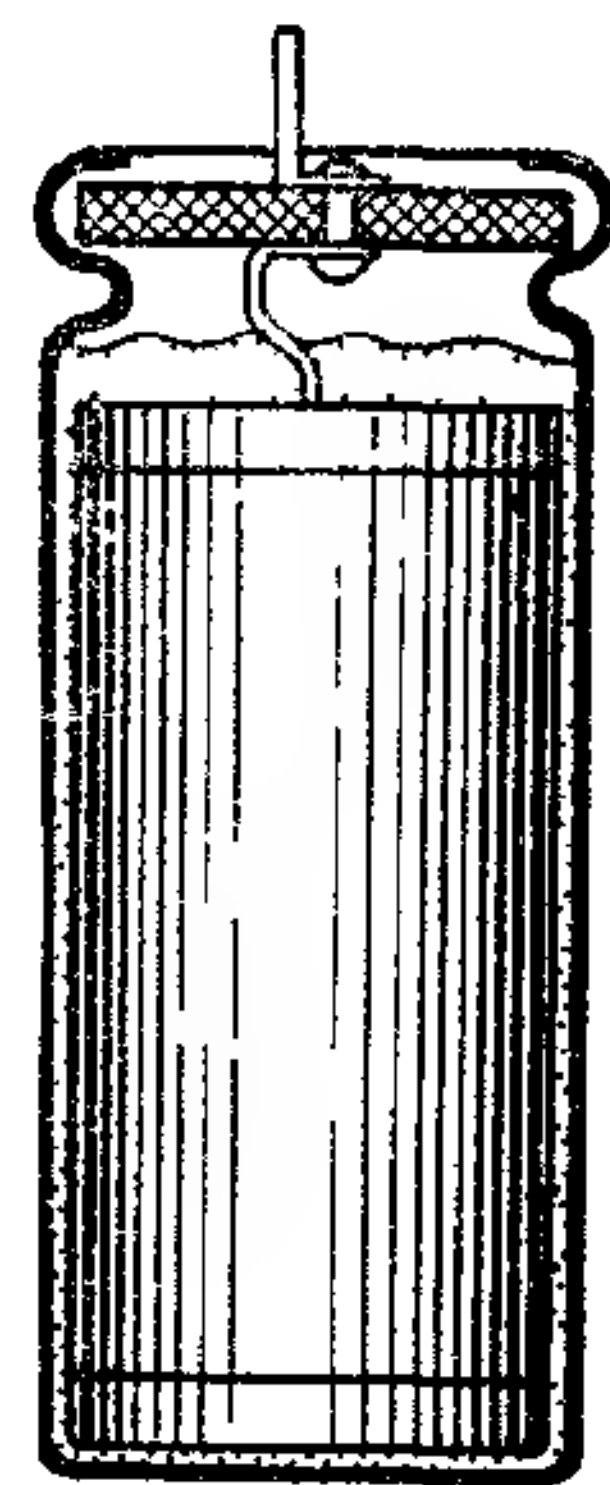


Рис. 272. Схема устройства сухого алюминиевого конденсатора.

Для изготовления анодной фольги должен применяться алюминий высокой степени чистоты, так как наличие примесей (железа, кремния, меди) затрудняет процесс создания оксидного слоя (процесс формовки) и дает увеличение тока утечки конденсаторов. В настоящее время имеются два сорта фольги: с содержанием алюминия 99,95% и 99,99%. Толщина анодной фольги 50, 100 и 120 мкм с допуском $\pm 10\%$. В современном конденсаторостроении анодная фольга обычно подвергается травлению для увеличения ее удельной поверхности при заданной площади анода. При шероховатой поверхности анода (результат травления) созданный при формовке тонкий оксидный слой следует за всеми неровностями (рис. 273), электролит, который служит второй обкладкой, также

заполняет неровности поверхности, что позволяет заметно увеличить емкость, приходящуюся на единицу площади по сравнению с гладким, нетравленным анодом. Отношение общей поверхности травле-

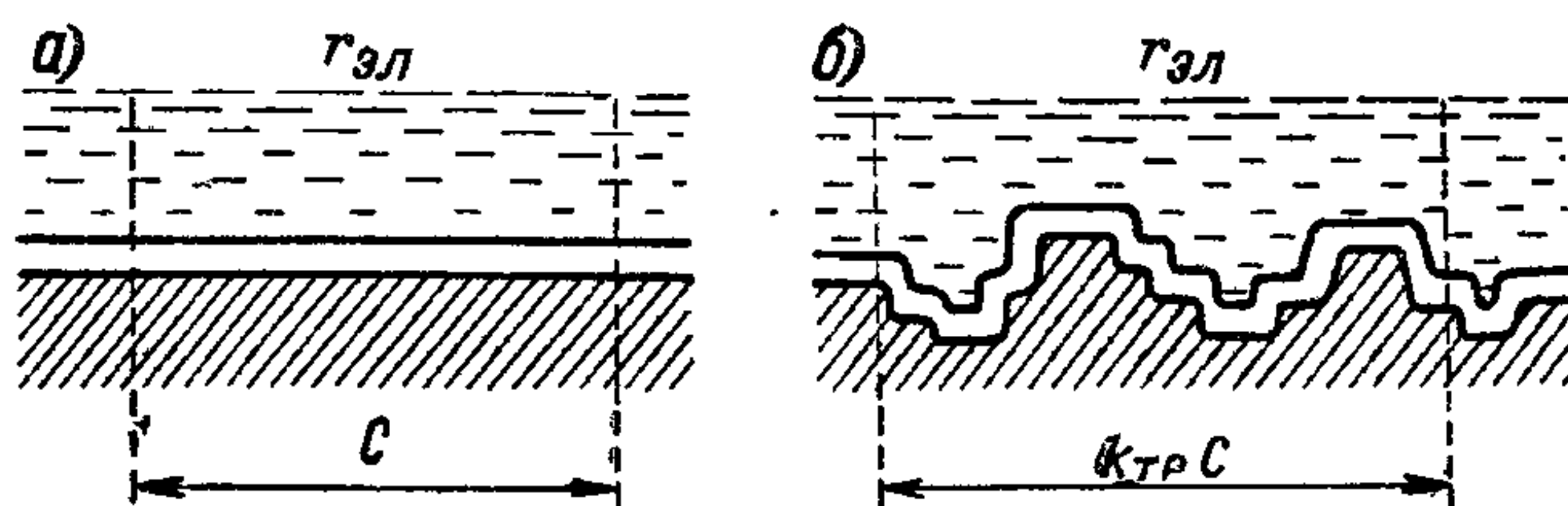


Рис. 273. Схематическое сравнение гладкого (а) и травленного (б) анодов.

ного анода $S_{\text{пов}}$ к его площади S_A носит название коэффициента травления:

$$k_{\text{тр}} = \frac{S_{\text{пов}}}{S_A}. \quad (284)$$

Коэффициент травления снижается с увеличением формовочного напряжения, т. е. с увеличением толщины оксидного слоя (рис. 274); если при малых $U_{\text{ф}}$ можно получать $k_{\text{тр}} \approx 10 \div 20$, то при $U_{\text{ф}}$ порядка сотен вольт $k_{\text{тр}}$ снижается до 5—10. Это объясняется тем, что при повышенной толщине оксида уже не будет сказываться влияние наиболее мелких неровностей на поверхности анода.

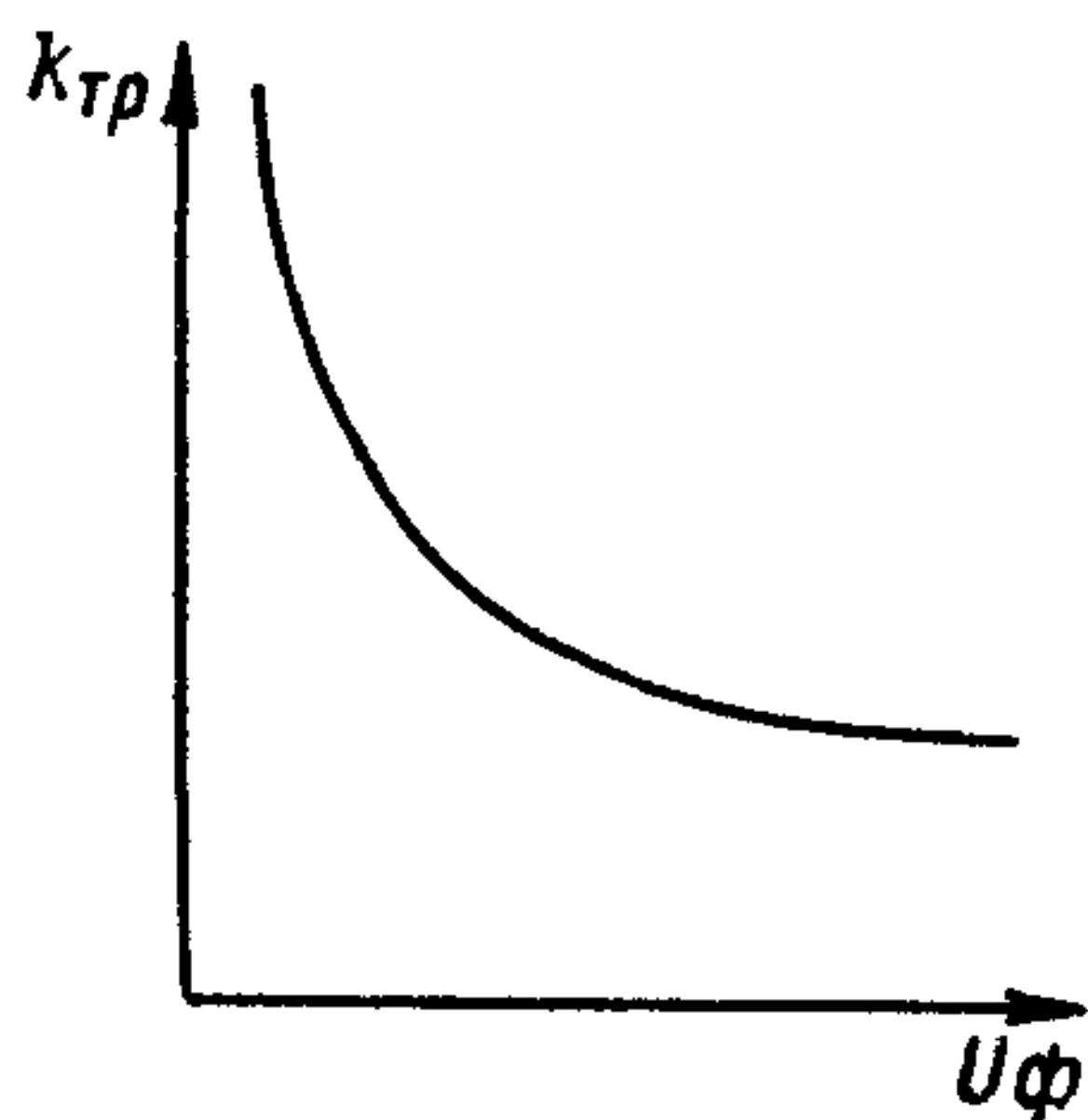


Рис. 274. Общий характер зависимости коэффициента травления от формовочного напряжения.

Ранее применялось химическое травление анодной фольги в растворах HCl , HCl с добавкой CuCl_2 или смеси $\text{HCl} + \text{HNO}_3$ при повышенных температурах порядка $70-90^\circ \text{C}$. Теперь основным методом является электрохимическое травление в растворе NaCl при температуре $40-60^\circ \text{C}$, при котором на анодную фольгу, проходящую через травильную ванну, подается небольшой положительный потенциал, создающий плотность тока порядка $0,75-0,150 \text{ а/см}^2$. При этом ионы хлора приходят к аноду, вызывая интенсивное разъедание его поверхности. Электрохимическое травление позволяет удешевить травящий раствор и уменьшить его вредность (иногда и при этом виде травления вместо NaCl все же применяют HCl); изменением плотности тока в ванне можно регулировать процесс травления, что также является преимуществом этого метода; он позволяет также получать большую однородность значений $k_{\text{тр}}$ по длине фольги.

Фольга повышенной чистоты (99,99% Al) травится хуже, чем фольга 99,95% Al , так как наличие примесей облегчает

разъедание поверхности анода в процессе травления. Однако при современной технологии травления и при использовании предварительного отжига фольги при температуре близкой к $t_{пл}$ алюминия удается получать высокие значения $k_{тр}$ и для фольги с такой степенью чистоты. По зарубежным данным при фольге 99,992—99,995% Al можно получать $k_{тр} = 8 \pm 0,8$ при $U_{ф} = 480$ в и $13 \pm 1,3$ при $U_{ф} = 10$ в. В связи с этим фольга 99,95% Al, при которой труднее иметь малый ток утечки, выходит из употребления и поставлена задача получения фольги из алюминия 99,9999%, изготовленного методом зонной плавки.

Схема установки для электрохимического травления анодной фольги показана на рис. 275. Перед травлением производится обез-

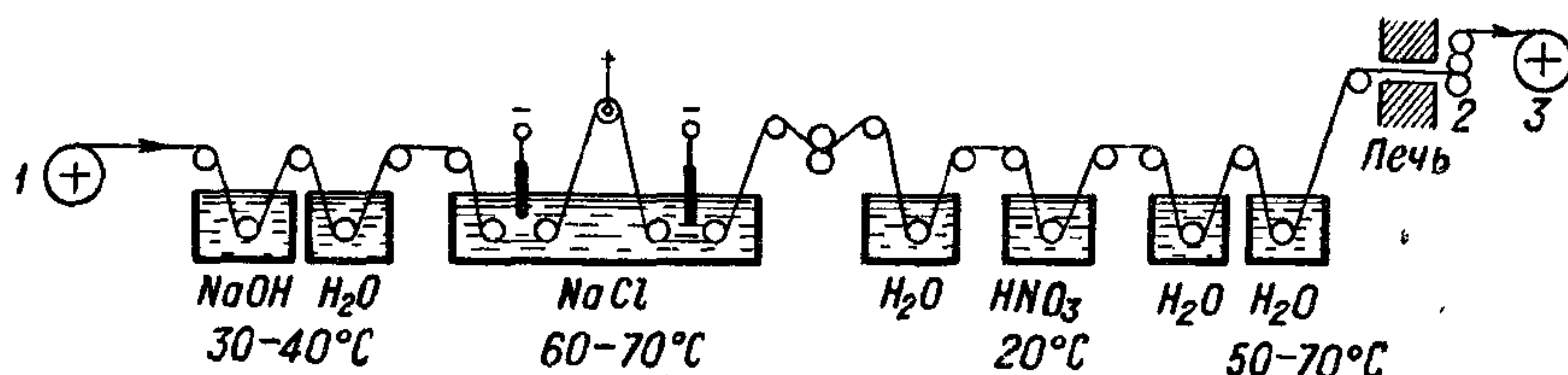


Рис. 275. Схема устройства динамической установки для электрохимического травления.

жирование фольги в щелочи и промывка в воде; после травления — промывка в воде и очистка в ванне с HNO_3 для удаления частиц металла, которые могли попасть на фольгу с контактных валиков; далее опять следует тщательная промывка. Для более тщательного удаления ионов хлора, остающихся в порах травленной фольги, при ее промывке в воде полезно подавать на фольгу отрицательный потенциал (э л е к т р о о с м о т и ч е с к а я о ч и с т к а). Это несколько усложняет оборудование, но резко улучшает качество очистки. Для получения анодов с увеличенной поверхностью было также предложено использовать ткань, металлизированную алюминием, нанося алюминий методом распыления (метод Шоопа) на редкую хлопчатобумажную ткань типа марли. Крупинки алюминия, покрывая нити ткани и забивая отверстия между ними, образуют на поверхности ткани слой чистого алюминия с сильно развитой поверхностью. В этом случае можно получить увеличение поверхности в 10—20 раз в сравнении с гладким анодом. Этот метод применялся за рубежом некоторыми фирмами¹, но не нашел применения в СССР.

Процесс создания оксидного слоя на поверхности анодной фольги электролитическим путем, как отмечено выше, получил название процесса *ф о р м о в к и*. Ранее применялась *с т а т и ч е с к а я* формовка, при которой отрезки алюминиевой фольги

¹ J. Katona. Acta technica Acadj Sc: Hungaricae, 1959, XXIV, № 3—4 p. 235—p 235—271.

подвешивали в ванне, наполненной электролитом, к алюминиевой фольге (анодным пластинам) подводился положительный полюс источника энергии постоянного тока, отрицательный полюс присоединялся к стенкам ванны (если она была изготовлена из металла) или к металлическим пластинам (катодам), подвешенным в промежутках между анодными пластинами (если ванна была изготовлена из керамики или иного изоляционного материала). При таком включении у поверхности анодных пластин в процессе электролиза выделяется кислород, который и производит окисление алюминия, образуя оксидный слой.

Если в процессе статической формовки поддерживать напряжение на ванне постоянным (рис. 276, а), то вследствие образования

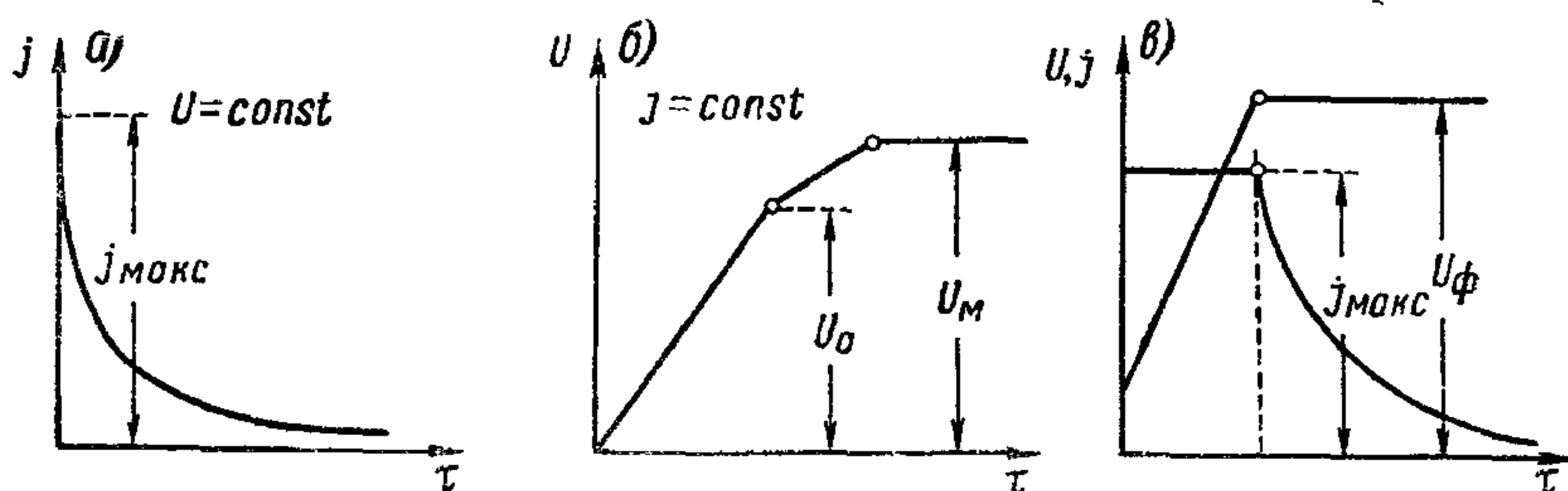


Рис. 276. Статическая формовка анодной фольги: а — при постоянном напряжении; б — при постоянной плотности тока; в — комбинированная.

оксидного слоя на аноде сопротивление ванны возрастает и плотность тока снижается, сначала быстро, а потом замедленно. Если же поддерживать постоянной плотность тока (рис. 276, б), то вследствие возрастания сопротивления ванны требуется непрерывно повышать напряжение, приложенное к ванне. Напряжение будет возрастать линейно до значения U_0 , называемого и с к р о в ы м н а п р я ж е н и е м. При этом напряжении на аноде начинают проскакивать отдельные мелкие искры. Дальнейшее нарастание напряжения также происходит линейно, но с меньшей скоростью, до значения $U_м$, называемого м а к с и м а л ь н ы м н а п р я ж е н и е м формовки. При этом значении напряжения вся поверхность анода покрывается крупными искрами и дальнейшее увеличение напряжения делается невозможным.

Искрообразование на аноде связано с нагревом электролита, заполняющего тонкие каналы в оксидном слое; нагрев канала прерывается с образованием газового пузырька, появляющегося вследствие нагрева или электролиза. При напряжениях выше 340 в происходит прерывистый разряд в газовых пузырьках, увеличивающий выделение тепла и усиливающий газообразование. Качество оксидного слоя снижается при искрении, а потому формовочное напряжение $U_ф$, при котором происходит образование оксидной пленки на аноде, должно быть меньше искрового напряжения U_0 .

Ф о р м о в о ч н о е н а п р я ж е н и е необходимо брать с известным запасом по отношению к $U_{\text{раб}}$. Чем больше этот запас, тем толще оксидный слой и тем меньше ток утечки конденсатора; однако при увеличении толщины слоя соответственно снижается и емкость. Практически при $U_{\text{раб}} \geq 150$ в принимают $U_{\text{ф}} = 1,15 \div 1,2U_{\text{раб}}$, а при меньших $U_{\text{раб}}$ берут $U_{\text{ф}} = 1,25 \div 1,5U_{\text{раб}}$.

Произведение формовочного напряжения на удельную емкость, рассчитанную на единицу площади анода, примерно постоянно:

$$C_{\text{уд}}U_{\text{ф}} = k_{\text{ф}} \approx \text{const.} \quad (285)$$

Здесь $C_{\text{уд}} = C/2L_{\text{А}}b_{\text{А}}$, где C — емкость конденсатора в мкф, $L_{\text{А}}$ — длина анода в см, $b_{\text{А}}$ — ширина анода в см.

Используя выражения (2) и (281) и согласовывая единицы измерения, получаем:

$$k_{\text{ф}} = 8,84 \frac{\varepsilon}{a} [\text{мкф} \cdot \text{в}/\text{см}^2], \quad (286)$$

где a — относительная толщина слоя оксида в Å/в.

Принимая для алюминия по табл. 27 значения $\varepsilon = 10$ и $a = 15 \div 17$ Å/в, находим для гладких алюминиевых анодов $k_{\text{ф}} \approx 5 \div 6$ мкф · в/см². Такие значения были найдены и из опыта, причем верхний предел соответствовал более высоким значениям формовочного напряжения. Если известно значение $k_{\text{ф}}$, то по заданному значению $U_{\text{ф}}$ можно вычислить $C_{\text{уд}}$ по формуле (285) и, зная $C_{\text{ном}}$ для изготавливаемого конденсатора, найти размеры анодной пластины. При травленых анодах величина $k_{\text{ф}}$ должна быть помножена на величину $k_{\text{тр}}$.

В качестве ф о р м о в о ч н о г о э л е к т р о л и т а теоретически можно взять чистую воду, которая при электролизе дает выделение кислорода у анода. Однако проводимость чистой воды мала, сопротивление ванны получится слишком большим и плотность тока будет недостаточной для формовки оксидного слоя. Поэтому в воду следует ввести какие-либо растворимые в ней химикаты, которые могли бы повысить проводимость получаемого раствора. При этом состав электролита должен быть таким, чтобы в нем не растворялась окись алюминия, образующая оксидный слой на поверхности анода.

В качестве формовочного электролита, практически не растворяющего оксидный слой, в производстве электролитических конденсаторов чаще всего применяют раствор борной кислоты H_3BO_3 с небольшой добавкой буры $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$; сочетание слабой кислоты и слабой щелочи берется таким, чтобы получить слабокислую реакцию. Вместо борной кислоты иногда применяют лимонную, а вместо буры — аммиак. Основными характеристиками электролита являются: концентрация водородных ионов, характеризуемая величиной pH , и удельное сопротивление ρ . Величина pH представляет собой логарифм концентрации водородных ионов, взятый с обратным знаком. Для чистой дистиллированной воды $pH = 7$,

при $pH > 7$ электролит дает щелочную реакцию, при $pH < 7$ — кислую, для формовочного электролита обычно $pH \approx 5 \div 6$.

Величина удельного сопротивления электролита определяет собой величину искрового напряжения, согласно эмпирической формуле

$$U_0 = \alpha \lg \rho + \beta. \quad (287)$$

При значениях $\lg \rho < 3,2 \div 3,5$ (ρ — в $\text{ом} \cdot \text{см}$ при 20°C) значения постоянных в формуле (287) составляют: $\alpha \approx 110$ и $\beta \approx 105$ и мало зависят от рецептуры электролита; при больших значениях ρ может сказываться и рецептура электролита.

При повышении $U_{\text{раб}}$ конденсатора необходимо соответственно повышать и $U_{\text{ф}}$, следовательно, и искровое напряжение электролита U_0 . Согласно формуле (287), для этого необходимо повышать ρ электролита, т. е. снижать концентрацию растворенных в нем химикалий, разбавляя его. При этом увеличивается сопротивление ванны и снижается плотность тока, т. е. количество электричества, переносимого к аноду в единицу времени, которое определяет собой нарастание оксидного слоя. Это замедляет процесс формовки и заставляет ограничивать верхний предел рабочего напряжения электролитических алюминиевых конденсаторов значением порядка 450—500 в. В пределе, применяя формовку в чистой воде и уменьшая сопротивление ванны сильным приближением формируемого анода к катодным пластинам, как показал А. А. Панов, можно поднять $U_{\text{ф}}$ до 900—1000 в и $U_{\text{раб}}$ — до 750—850 в. Подобные значения рабочих напряжений не внедрились в практику (как указывалось, обычное максимальное значение $U_{\text{раб}}$ равно 450—500 в).

При формовке в электролитах, практически не растворяющих оксидный слой, на поверхности алюминия образуется тонкий сплошной слой оксида, толщину которого можно найти по формуле (281). Этот слой представляет собой сплошную пленку окиси алюминия Al_2O_3 , являющуюся сочетанием аморфной фазы с более или менее выраженными кристаллическими элементами с кубической структурой $\gamma'\text{Al}_2\text{O}_3$ (корунд $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ кристаллизуется в ромбоэдрической системе, а $\beta\text{Al}_2\text{O}_3$ в гексагональной).

При формовке в электролитах, растворяющих окись алюминия, например в серной или щавелевой кислоте, на поверхности анода образуется относительно толстый (до нескольких микрон и выше), но пористый оксидный слой, содержащий значительное количество гидрата окиси алюминия (гидрагилит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и бомит или диаспор $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Подобная формовка применяется при получении оксидной изоляции на алюминиевых проводах. Было также показано, что при изготовлении конденсаторов с напряжением порядка сотен вольт оказывается полезным применять предварительную формовку в серной кислоте перед окончательной формовкой в растворе борной кислоты и буры. В процессе предварительной формовки создается грубый пористый слой,

защитающий более нежный и тонкий сплошной, образующийся при окончательной формовке на дне сквозных пор грубого слоя, доходящих до поверхности алюминия (рис. 277). В частности, наличие грубого слоя защищает тонкий активный слой от разрушающего влияния небольших остаточных загрязнений, содержащихся в волокнистой прокладке или рабочем электролите (хлоридов, сульфатов и т. п.). Получение защитного грубого слоя можно обеспечить также кипячением анодов в воде (гидратированием).

Как отмечалось выше, при статической формовке можно работать при постоянном напряжении на ванне или при постоянной плотности тока в ванне (рис. 276). Практически оба эти метода объединяются: сначала постепенно увеличивают напряжение на ванне, поддерживая постоянство плотности тока (в соответствии с мощностью источника энергии), пока не будет получено заданное значение $U_{\text{ф}}$; далее процесс идет при постоянном значении напряжения и снижающейся плотности тока (рис. 276, в).

В современном производстве применяют метод динамической формовки, при котором фольга, сматываясь с рулона,

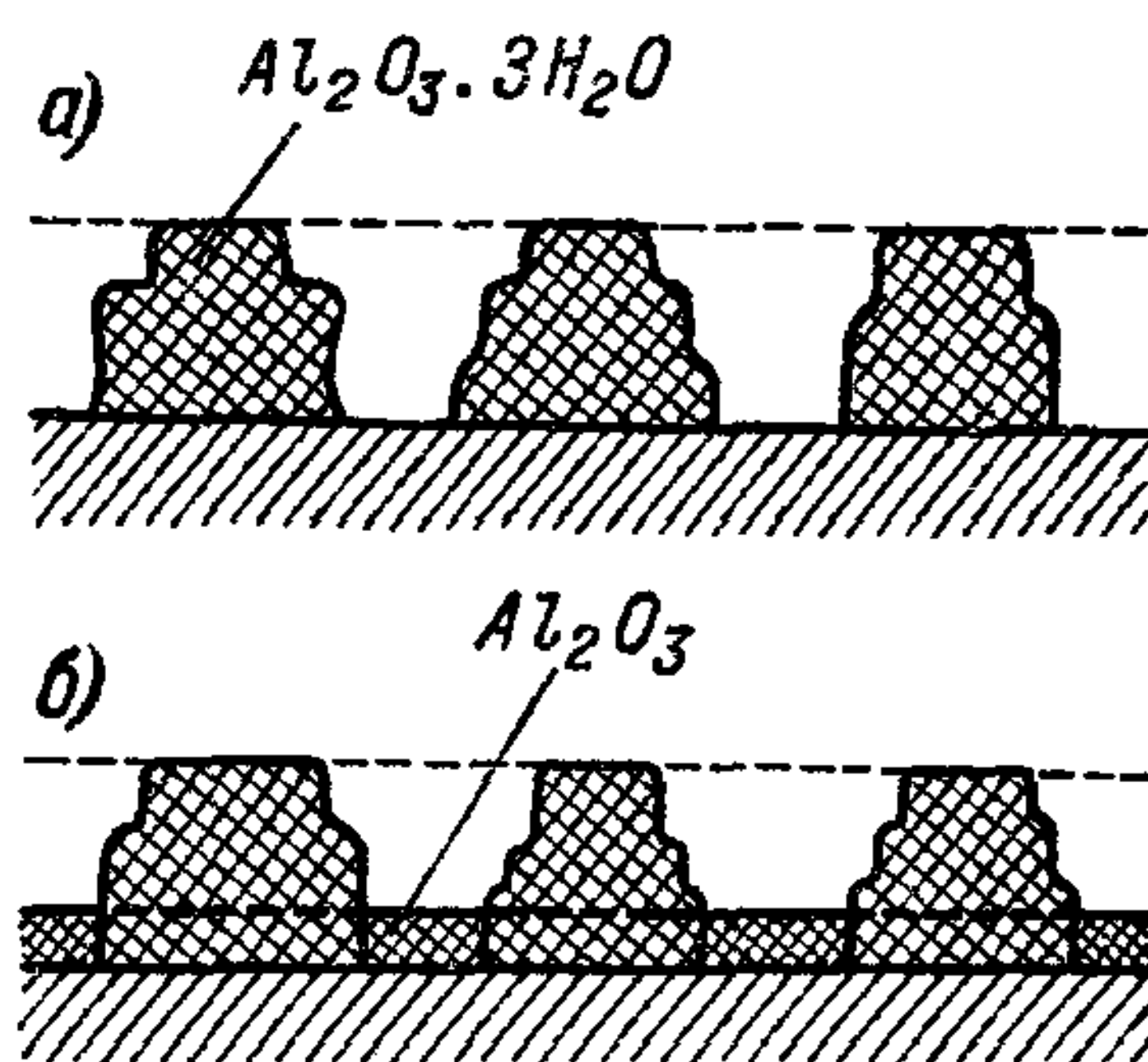


Рис. 277. Схема строения оксидных слоев на алюминии: а — грубый гидратированный слой после формовки в серной кислоте; б — тонкий слой окиси алюминия, созданный в порах грубого слоя после формовки в растворе борной кислоты и буры.

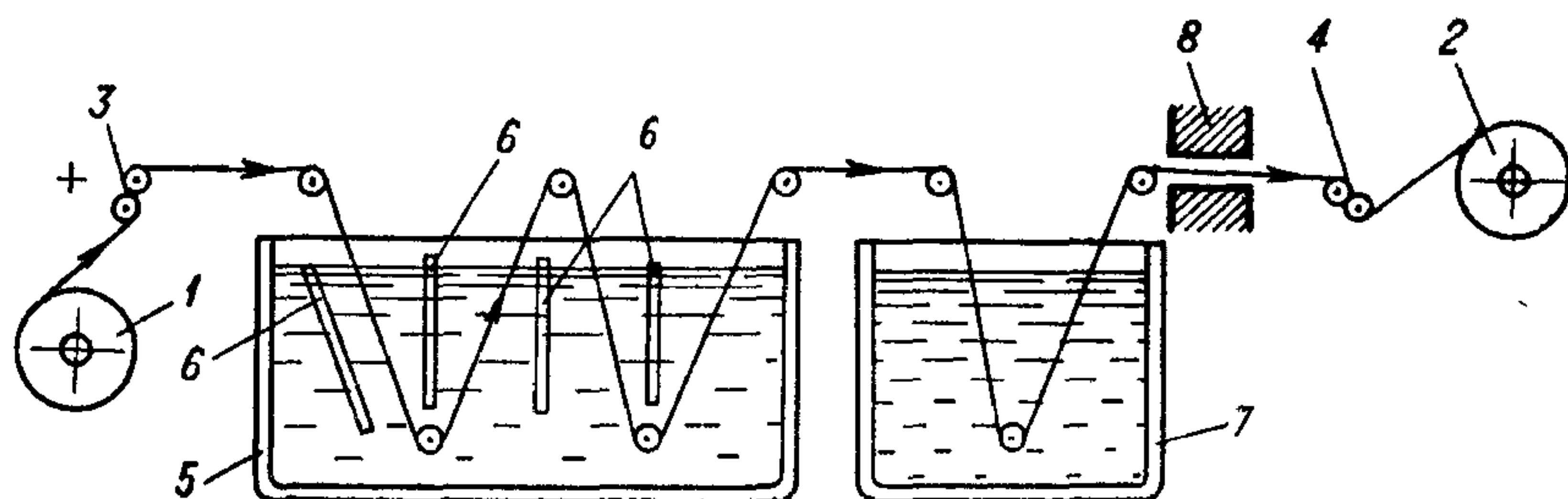


Рис. 278. Схема установки для динамической формовки.

1 — рулон неоксидированной фольги; 2 — рулон оксидированной фольги; 3 — контактные валики; 4 — тянущие валики; 5 — формовочная ванна; 6 — добавочные катоды; 7 — ванна для промывки; 8 — сушильная печь.

непрерывно движется через формовочную ванну, промывается, сушится и уже в оксидированном виде наматывается в рулон (рис. 278). Преимуществами динамической формовки перед статической являются: увеличение плотности тока формовки, ускоряющее процесс образования оксидного слоя; улучшение однородности

оксидного слоя по длине анодной ленты; улучшение загрузки источника энергии, питающего формовочную ванну; сокращение ручного труда на производство формовки.

При динамической формовке получается высокая плотность тока в месте входа фольги в ванну. По данным Л. Н. Закгейма, спадание плотности тока по длине фольги, погруженной в электролит, может быть представлена выражением

$$j_{\tau} = j_m (e^{-\beta \tau} + \alpha), \quad (288)$$

где j_m — максимальная плотность тока в месте входа фольги в электролит в a/cm^2 , j_{τ} — плотность тока на расстоянии x см от места входа; это расстояние фольга проходит за время τ сек; α и β — постоянные коэффициенты, имеющие значения: $\alpha \approx 0,01 \div 0,02$, $\beta \approx 0,3$. Если скорость движения фольги через ванну равна v см/сек, то $x = v\tau$ и $\tau = x/v$.

Ток dI , протекающий через элемент поверхности фольги, находящейся в электролите, при ширине фольги b см и длине элемента dx будет равен:

$$dI = j_{\tau} dS = 2j_{\tau} b dx = 2j_m \left(e^{-\beta \tau} + \alpha \right) b dx = 2j_m \left(e^{-\frac{\beta x}{v}} + \alpha \right) b dx.$$

Интегрируя по всей длине фольги, погруженной в электролит, и решая полученное уравнение относительно j_m , получим:

$$j_m = \frac{I}{2b \left[\frac{v}{\beta} \left(1 - e^{-\frac{\beta l}{v}} + \alpha l \right) \right]} \approx \frac{I}{2b \left(\frac{v}{\beta} + \alpha l \right)}, \quad (289)$$

где I — ток, потребляемый ванной, a и l — длина ленты фольги, погруженной в электролит в см.

Если ванна потребляет ток 100 а при скорости движения фольги 0,2 см/сек (7,2 м/ч), длине лент фольги в ванне порядка 800 см и общей ширине лент в ванне 25 см, то при указанных выше значениях α и β по формуле (289) получаем значение максимальной плотности тока на входе в ванну порядка 0,12—0,23 а/см². При статической формовке плотность тока обычно не превышает 0,02 а/см². В связи с этим переход от статической к динамической формовке позволил резко ускорить процесс образования оксидного слоя на анодной фольге.

При большой скорости движения фольги через ванну и при формовочном напряжении порядка нескольких сотен вольт плотность тока при входе фольги в ванну может достигать высоких значений, и выделение мощности в начальном участке фольги может возрасти до такой степени, что возникнет опасность сжигания фольги током. Для устранения этой опасности применяют ступенчатую формовку в нескольких ваннах, питаемых от отдельных источников энергии, с постепенным увеличением напряжения на каждой следующей ванне (рис. 279) и соответственно с постепенным ослаб-

лением концентрации электролита. При относительно небольшом напряжении на первых ваннах можно увеличивать плотность тока, не боясь перегрева фольги при входе в электролит, и этим ускорить процесс образования основной части оксидного слоя. Таким образом можно значительно повысить скорость формовки анодной фольги и для конденсаторов с повышенным рабочим напряжением. При одноступенчатой формовке при $U_{\text{ф}} = 10 \div 185$ в скорость $v = 10 \div 15$ м/ч (большее значение при меньшем напряжении), при 350—550 в порядка 7—8 м/ч для гладкой фольги, а для травленной еще меньше. При трехступенчатой формовке и $U_{\text{ф}} = 300 \div 450$ в скорость $v = 20 \div 35$ м/ч для гладкой фольги и 12—25 м/ч для травленной; на пятиступенчатой ванне фирмы «Тесла» (ЧССР) при $U_{\text{ф}} = 350 \div 450$ в достигается скорость 40—50 м/ч.

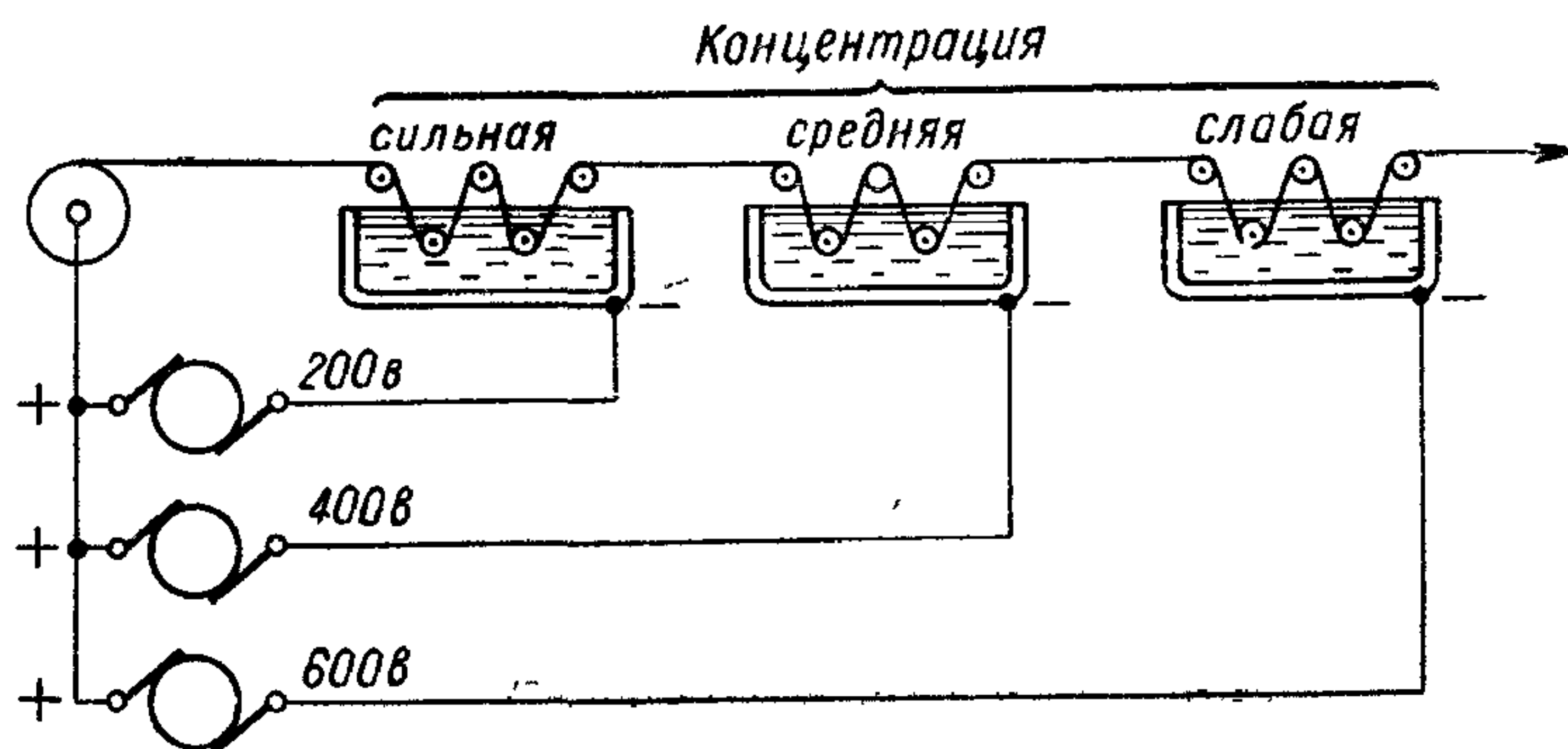


Рис. 279. Схема трехступенчатой формовки.

В связи с недостаточной однородностью значений $k_{\text{тр}}$ по длине анодной фольги и связанными с этим большими колебаниями емкости, рассчитанной на единицу площади анода, обычно вводят операцию нормирования формованной алюминиевой фольги. Для этого в определенных местах по длине анодной ленты вырезаются стандартные кусочки формованной фольги и помещаются в электролит, образуя макеты конденсаторов, у которых измеряют емкость. Результаты измерения записываются на бумажке, которая вкладывается в соответствующее место рулона. Когда при намотке устанавливается необходимая длина анода, обеспечивающая заданную емкость, ориентируются на эти записи. Некоторые зарубежные фирмы снизили разброс значений $k_{\text{тр}}$ до $\pm 10\%$, при этом необходимость проведения нормирования отпадает. Секции сухих конденсаторов (рис. 269, б) изготавливают намоткой на намоточных станках, похожих на станки для намотки бумажных конденсаторов, но упрощенной конструкции; при изготовлении миниатюрных конденсаторов (например, ЭМ и К50-9) используют ручные приспособления. На намоточный станок устанавливают рулон с катодной фольгой и рулоны бумаги (волоконистую прокладку), анодная фольга обычно заранее разрезается на

отрезки нужной длины (для получения заданной $C_{\text{ном}}$) и скрепляется с анодным выводом; для изготовления выводов применяют алюминиевую фольгу толщиной 100 мкм, отформованную до напряжения не ниже $U_{\text{ф}}$, использованного для формовки анодов, и нарезанную на полосы шириной 5—10 мм и длиной, равной двойной ширине анодной ленты. Край анодной ленты загибают на вывод и скрепляют с ним «холодной сваркой» или иным методом, обеспечивающим электрический контакт.

В качестве катодной ленты применяют гладкую алюминиевую фольгу¹ с содержанием алюминия 99,6%, толщина ее от 7,5 до 16 мкм. Ширину катодной фольги обычно берут на 2 мм больше ширины анодной. В качестве волокнистой прокладки обычно применяется специальная электролитическая бумага, отличающаяся высокой чистотой и хорошей впитываемостью. Толщина бумаги 25—100 мкм, объемный вес 0,55—0,7 г/см³. Для конденсаторов с $U_{\text{раб}} \leq 300$ в применяют один-два слоя бумаги общей толщиной 60—100 мкм, при $U_{\text{раб}} = 400$ в — два слоя общей толщиной 120 мкм и при $U_{\text{раб}} = 500$ в — два-три слоя общей толщиной 200—250 мкм. Увеличение числа слоев с повышением рабочего напряжения объясняется желанием уменьшить опасность пробоя оксидного диэлектрика при сквозном проводящем включении в бумаге, которое может дать соединение анода с катодом. Одной из характеристик качества бумажной прокладки является коэффициент проницаемости φ , характеризующий структуру прокладки и показывающий, во сколько раз сопротивление прокладки, пропитанной электролитом, $r_{\text{эл}}$ будет больше сопротивления слоя электролита $r'_{\text{эл}}$ при толщине слоя, равной толщине прокладки, и при той же площади. Таким образом,

$$\varphi = \frac{r_{\text{эл}}}{r'_{\text{эл}}}. \quad (290)$$

В связи с этим сопротивление прокладки, включенное последовательно с емкостью оксидного слоя и определяющее собой угол потерь и температурно-частотные характеристики конденсатора (рис. 267), можно найти по формуле

$$r_{\text{эл}} = \rho \varphi \frac{d_{\text{пр}}}{2S_{\text{А}}} [\text{ом}], \quad (291)$$

где ρ — удельное сопротивление электролита в $\text{ом} \cdot \text{см}$, $d_{\text{пр}}$ — толщина прокладки в см , $S_{\text{А}}$ — площадь анода в см^2 ($S_{\text{А}} = L_{\text{А}} b_{\text{А}}$).

Для электролитической бумаги $\varphi \approx 25 \div 30$. При изготовлении малогабаритных конденсаторов низкого напряжения, а иногда и при более высоких напряжениях, с целью улучшения удельных

¹ Иногда используется также травленая алюминиевая фольга или фольга из неокисляющегося металла, если надо снизить влияние заформовки катода при действии переменной составляющей тока или иных причин на емкость конденсатора.

характеристик наряду с электролитической бумагой применяют также некаландрированную конденсаторную бумагу с объемным весом порядка $0,8\text{--}0,9\text{ г/см}^3$ и толщиной $10\text{--}12\text{ мм}$; для нее $\varphi \approx 40 \div 50$. Возможно также применение двухслойной бумаги, состоящей из слоя с малым объемным весом, подобного обычной электролитической бумаге и тонкого слоя с повышенным объемным весом, подобного обычной конденсаторной бумаге. Резкое снижение φ до $5\text{--}10$ можно получить, заменив бумагу специальными сортами ткани, однако толщина ткани выше, чем у бумаги (порядка $120\text{--}150\text{ мм}$), а потому, применяя ткань, не всегда можно снизить $r_{\text{эл}}$, зависящее не только от φ , но и от $d_{\text{пр}}$.

При намотке секций сухих конденсаторов нарезанные анодные ленты с прикрепленными к ним анодными выводами вкладываются между лентами бумаги, сматывающимися с рулонов, поставленных на станок, и вместе с катодной фольгой, также сматываемой с рулона, наматываются на оправку. После того как анодная лента полностью намотана на оправку, ленты бумаги обрезают и дают дополнительный виток катодной ленты, затем обрезается катодная лента, на секцию надевается скрепляющее резиновое колечко, и она снимается с оправки.

Намотанные секции подвергают пропитке рабочим электролитом, используя различные методы: открытая «проварка» на воздухе обычно заменяется пропиткой в вакууме, иногда применяется также пропитка на центрифуге, при которой электролит вгоняется в секцию за счет воздействия центробежной силы, что обеспечивает высокое качество пропитки. Новым методом, опробованным для пропитки секций сухих электролитических конденсаторов, является пропитка с использованием ультразвука. При таком методе можно получить значительное ускорение процесса пропитки по сравнению с вакуумной; кроме того, из электролита не удаляются летучие компоненты, как при вакуумной пропитке, что позволяет реже заменять электролит в пропиточном баке и экономить расход химикатов, применяемых для его изготовления.

Рабочий электролит для сухих конденсаторов обычно состоит из борной кислоты H_3BO_3 , водного раствора аммиака NH_4OH и вязкого растворителя — этиленгликоля $\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$; последний имеет плотность $1,12\text{ г/см}^3$, температуру замерзания $-17,4^\circ\text{C}$ и температуру кипения 197°C . Применяя этиленгликоль, можно получать нижний предел рабочей температуры конденсаторов до -40°C ; для снижения рабочей температуры до -60°C необходимо снижать вязкость растворителя и его температуру замерзания, добавляя в состав готового электролита этиловый спирт $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ или метилгликоль $\text{C}_2\text{H}_4\text{OH}-\text{OSn}_3$ (представляющий собой эфир этиленгликоля и метилового спирта).

Иногда аммиак вводится в рабочий электролит не в виде водного раствора, а в виде газа, продуваемого через раствор борной кислоты в этиленгликоле.

При варке электролита борная кислота реагирует с этиленгликолем, образуя гликобаты — эфиры борной кислоты и этиленгликоля, причем отщепляется вода. Аммиак связывается с гликобонатом, образуя комплексные соединения. Проводимость электролита определяется содержанием в нем воды и аммиака; ее можно регулировать в известных пределах, изменяя температуру варки электролита. Об уменьшении содержания воды в электролите можно судить по повышению его точки кипения после прогрева, которое сопровождается увеличением искрового напряжения U_0 за счет возрастания удельного сопротивления [формула (287)].

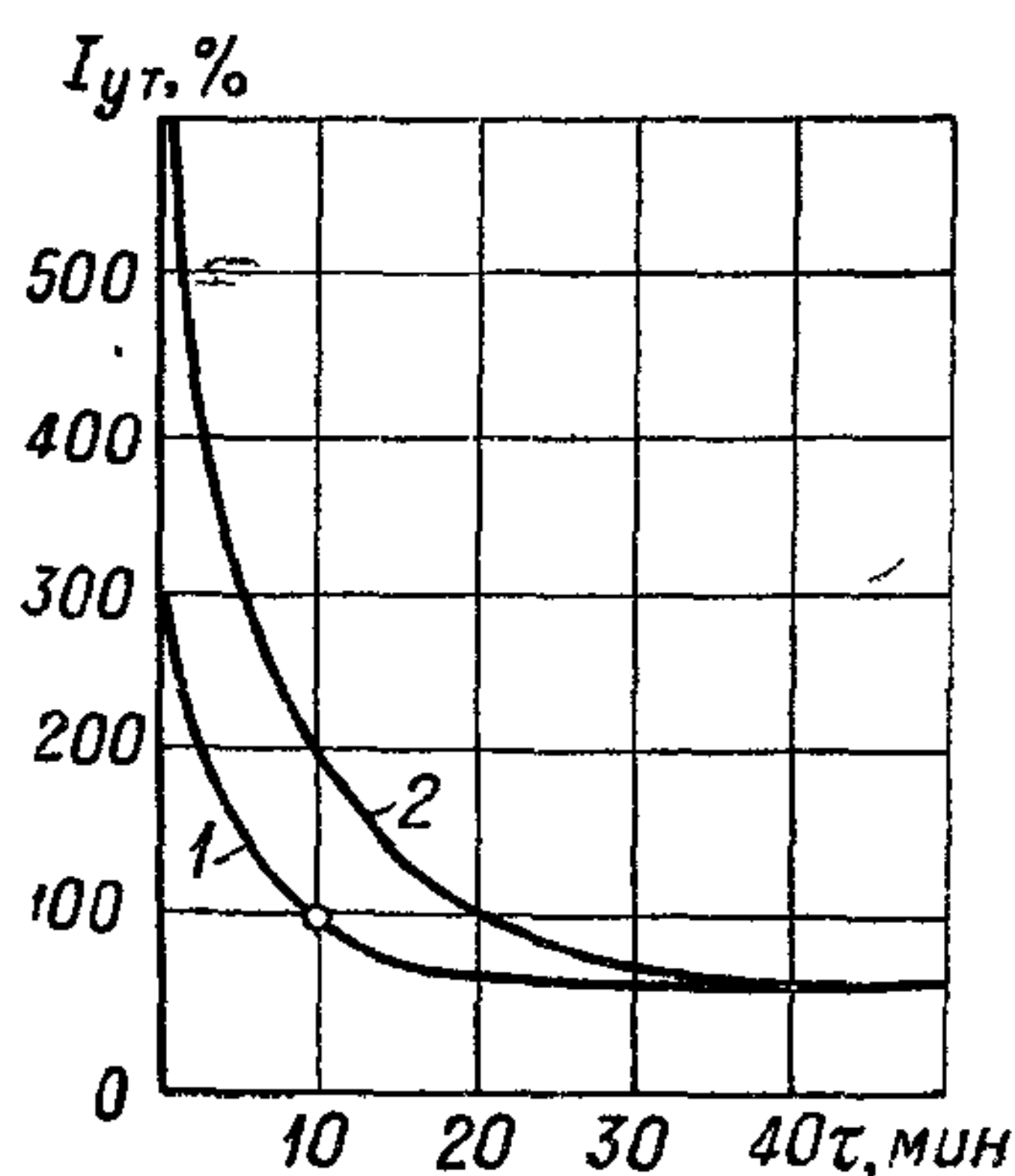


Рис. 280. Зависимость тока утечки сухого алюминиевого конденсатора от времени с момента приложения напряжения.

1 — свежеизготовленный конденсатор; 2 — после длительного хранения без напряжения (ток указан в % от его значения через 10 мин для свежего конденсатора).

Перегрев электролита в процессе варки вызывает его полимеризацию и превращение в твердую стекловидную массу, непригодную для пропитки. Оптимальный режим варки надо выбирать с таким расчетом, чтобы полученное значение ρ электролита было бы достаточным для обеспечения нужной величины U_0 , но в то же время еще не вызвало бы недопустимого возрастания $\lg \delta$ и ухудшения морозостойкости. По данным Л. Н. Закгейма, при $\rho \approx 5 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^4 \text{ ом} \cdot \text{см}$ можно получить $U_0 = 600 \text{ в}$; обычно применяемые гликобонатные электролиты имеют $\rho \approx 10^3 \text{ ом} \cdot \text{см}$. Следует иметь в виду, что электролиты этого типа позволяют получать лишь ограниченный температурный интервал работы электролитического конденсатора, порядка $100\text{—}120^\circ \text{C}$; иными словами, при $t_{\min} \approx -(40 \div 60)^\circ \text{C}$ можно иметь t_{\max} порядка $+60^\circ \text{C}$; для того чтобы довести t_{\max} до $+85^\circ \text{C}$, надо соответственно повысить t_{\min} до $-(10 \div 20)^\circ \text{C}$. Это связано с тем, что, добиваясь улучшения морозостойкости, приходится снижать вязкость электролита, а это приводит к увеличению тока утечки при повышенных температурах, ограничивая величину t_{\max} . Кроме того, электролит этого типа не является вполне нейтральным по отношению к оксидному слою на алюминии, что при длительном хранении конденсатора может приводить к частичному растворению оксида. Это вызывает небольшое увеличение емкости и заметное возрастание тока утечки при включении конденсатора, длительно хранившегося в бездействии (рис. 280). Такое явление носит название расформовки и приводит к необходимости проводить подформовку взятых со склада конденсаторов, включая их на некоторое время под напряжение через ограничительное сопротивление перед тем, как монтировать их в аппаратуру.

Усовершенствование рецептуры рабочего электролита было недавно проведено в Канаде и быстро доведено до промышленного использования также в Англии и в США. В основу новой рецептуры положена идея подбора такого растворителя, который не вступал бы в реакцию этерификации, способную в дальнейшем вызывать процесс полимеризации. При этом обеспечивается увеличение стабильности свойств электролита во времени, уменьшение вязкости в виду ослабления взаимодействия между молекулами (при отсутствии длинных полимерных цепей) и снижение удельного сопротивления, что улучшает температурно-частотные характеристики. В новом электролите этиленгликоль заменен диметилоформамидом, причем для улучшения растворимости в нем бората аммония, составляющего по-прежнему важную часть в рецептуре, добавляется низкомолекулярный спирт; для улучшения стабильности электролита при повышенных температурах и ослабления его растворяющего действия на Al_2O_3 вводится добавка фосфорнокислого аммония $(NH_4)H_2PO_4$. Для такого электролита при комнатной температуре было получено $\rho \approx 100 \div 800 \text{ ом} \cdot \text{см}$; это позволило снизить $\text{tg } \delta$ конденсаторов до 0,025—0,030 и получить рабочий интервал температур от -55 до $+125^\circ \text{C}$ (полный интервал 180°C). Указывается, что при таком электролите можно изготовлять конденсаторы с номинальным напряжением от 3 до 300 в; по-видимому, получение более высоких $U_{\text{ном}}$ встретило затруднения.

Следует отметить, что снижение ρ электролита (т. е. снижение сопротивления прокладки $r_{\text{эл}}$) позволяет повышать величину $k_{\text{тр}}$, т. е. интенсивность травления, и уменьшать габариты конденсаторов. Действительно, как при гладком, так и при травленном аноде (рис. 273) на единицу его площади приходится одно и то же значение $r_{\text{эл}}$, тогда как емкость, рассчитанная на единицу площади, во втором случае должна возрасти в $k_{\text{тр}}$ раз. Это должно вызывать соответственное увеличение $\text{tg } \delta$ со всеми вытекающими из этого последствиями по ухудшению температурно-частотных зависимостей. Выход из положения можно найти только по линии применения электролитов с меньшим ρ при увеличении степени травления анодной фольги.

После намотки и пропитки секция сухого конденсатора имеет резко увеличенный ток утечки. Это объясняется главным образом тем, что при нарезке анодных пластин и выводов из оксидированной фольги в местах разреза повреждается оксидный слой. Для заформовки поврежденных участков и снижения тока утечки до нормальных пределов производится операция тренировки (вторичной формовки) намотанных и пропитанных секций, обычно уже после сборки их в корпусах, но до закатки крышек. Тренировка заключается в том, что секции включают на некоторое время под номинальное напряжение через последовательно включенное сопротивление, ограничивающее ток в начале процесса во избежание недопустимого перегрева секций.

В составе рабочего электролита сухого конденсатора всегда имеется известное количество воды, которое не полностью удаляется в процессе варки. Поэтому вопрос о влагозащите этих конденсаторов надо ставить иначе, чем для обычных конденсаторов с твердым диэлектриком. При проникновении влаги внутрь секции увеличивается ее содержание в рабочем электролите, что снижает его сопротивление; при этом $\operatorname{tg} \delta$ уменьшается, а ток утечки возрастает, но может далее опять снизиться (рис. 281). Для высоковольтных конденсаторов представляет опасность снижение искрового напряжения U_0 при уменьшении ρ электролита, вызванного избыточным количеством воды. С другой стороны, опасно и пребы-

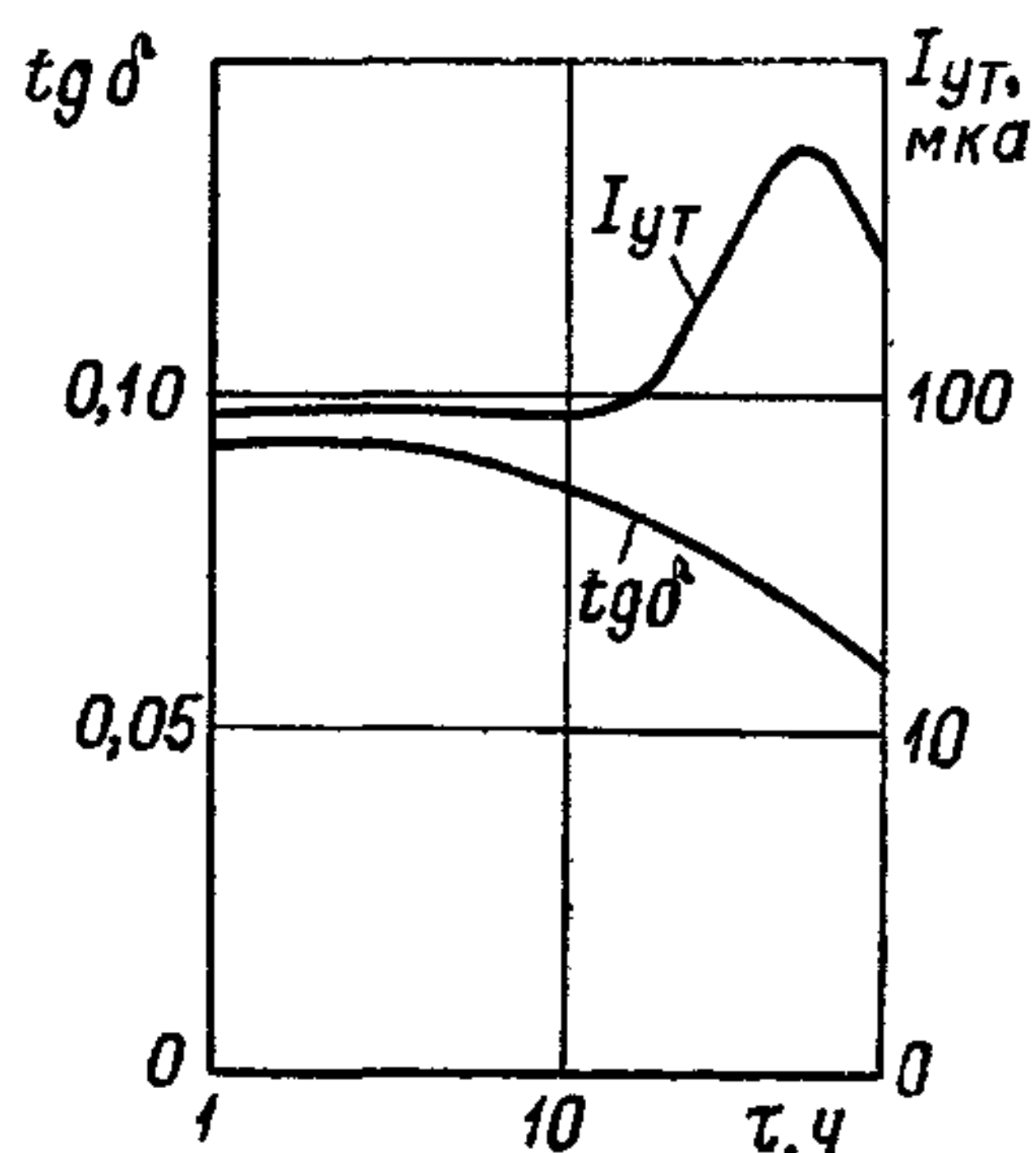


Рис. 281. Зависимость тока утечки и угла потерь незащищенной секции сухого конденсатора от времени выдержки при влажности 93% (конденсатор 450 в, 16 мкф).

вание плохо защищенного конденсатора в сухих условиях. При этом возможна постепенная потеря воды и других летучих, содержащихся в электролите, что будет связано с постепенным увеличением ρ и $\operatorname{tg} \delta$, снижением эффективной емкости, а также ухудшением морозостойкости.

Обычно для электролитических конденсаторов считается достаточным применять уплотненные конструкции, но в некоторых случаях используют и герметизацию. При этом следует учитывать, что электролитические конденсаторы имеют значительный ток утечки. Электролитическая природа этого тока связана с выделением газов у обкладок конденсатора и в принципе создает опасность постепенного повышения давления внутри герметизированного кон-

денсатора до такой степени, которая может привести к взрыву. Поэтому в ряде случаев при герметизации конструкции электролитического конденсатора в ней предусматривается клапан в виде небольшого отверстия, закрытого припаянным к корпусу кусочком тонкой металлической фольги. Клапан рассчитывается так, чтобы при опасном нарастании давления происходило разрушение фольги и выход газа через открывшееся отверстие.

До последнего времени основным типом сухого алюминиевого конденсатора в СССР являлся тип КЭ (ГОСТ 5561—54), выпускавшийся в двух основных модификациях: морозостойкой (группа М с травленными анодами) до -40°C и особо морозостойкой (группа ОМ с гладкими анодами) до -60°C ; верхний предел температуры в обоих случаях составлял $+60^\circ \text{C}$. Уплотненная конструкция конденсаторов КЭ допускала их длительную работу при влажности 80% и кратковременную (до 250 ч) при влажности 98%. Обычный допуск по емкости $-20 \div +50\%$; при t_{\min} емкость не менее 50% от ее значения при $+20^\circ \text{C}$; при t_{\max} увеличение емкости

не более 15% для ОМ и не более 30% для М. Наибольшие допускаемые значения $\operatorname{tg} \delta$ при 15—25° С и частоте 50 гц и амплитуды напряжения переменного тока (50 гц) (при условии, что сумма постоянной составляющей и амплитуды переменной составляющей не превышает $U_{\text{ном}}$) приведены ниже:

Группа	tg δ	Амплитуда переменной составляющей, %, при емкости, мкф		
		20—20	30—100	выше 100
ОМ				
$U_{\text{НОМ}} = 20 \div 50 \text{ в}$	0,2	25	15	8
$U_{\text{НОМ}} = 150 \div 450 \text{ в}$	0,1	10	8 *	—
М				
$U_{\text{НОМ}} = 8 \div 50 \text{ в}$	0,2	15	10	5
$U_{\text{НОМ}} = 150 \div 500 \text{ в}$	0,1	10	6 **	—

* При напряжениях не выше 300 в.

** При напряжениях не выше 450 в.

При частоте 100 гц указанные здесь значения амплитуды должны быть снижены в 2 раза.

Вместо постоянной времени для конденсаторов КЭ нормируется ток утечки, который не должен превышать значение, вычисляемое по формуле

$$I = kCU \cdot 10^{-4} + m \text{ (ма)}, \quad (292)$$

где C — номинальная емкость в мкф, U — номинальное напряжение в в, величина m зависит от емкости: $m = 0,2$ при 5 мкф, $m = 0,1$ при 8—50 мкф и $m = 0$ при $C > 50$ мкф; множитель $k = 1$ при 20° С и $k = 3$ при 60° С.

Согласно формуле (292), конденсатор 450 в, 20 мкф должен иметь ток утечки при 20° С не выше: $1 \cdot 20 \cdot 450 \cdot 10^{-4} + 0,1 = 1 \text{ ма}$; это соответствует величине $R_{\text{из}} = 0,45 \text{ Мом}$ и постоянной времени $R_{\text{из}}C = 9 \text{ сек}$; при 60° С допускаемое значение снижается до 3 сек. Для конденсатора 12 в, 2000 мкф получаем (при 20° С) $I = 2,4 \text{ ма}$; $R_{\text{из}} = 0,005 \text{ Мом}$; $R_{\text{из}} \cdot C = 10 \text{ сек}$ (10 Мом \times мкф).

Таким образом, норма на постоянную времени для электролитических алюминиевых конденсаторов в 20 раз ниже, чем для металлобумажных конденсаторов и в 200 раз ниже, чем для герметизированных бумажных конденсаторов.

Ток утечки электролитического конденсатора сильно зависит от времени с момента приложения напряжения до момента измерения (рис. 280); обычно измерение тока утечки при проверке качества электролитических конденсаторов производят через 5 мин после включения под напряжение. Ток утечки также зависит от приложенного напряжения, увеличиваясь с ростом напряжения сначала медленно, а затем быстро (рис. 282); переход к напряжениям выше U_{ϕ} дает резкое возрастание тока. В связи с этим электролитические конденсаторы не подвергаются испытанию на пробой, хотя некоторые фирмы указывают для них пиковое напряжение, характери-

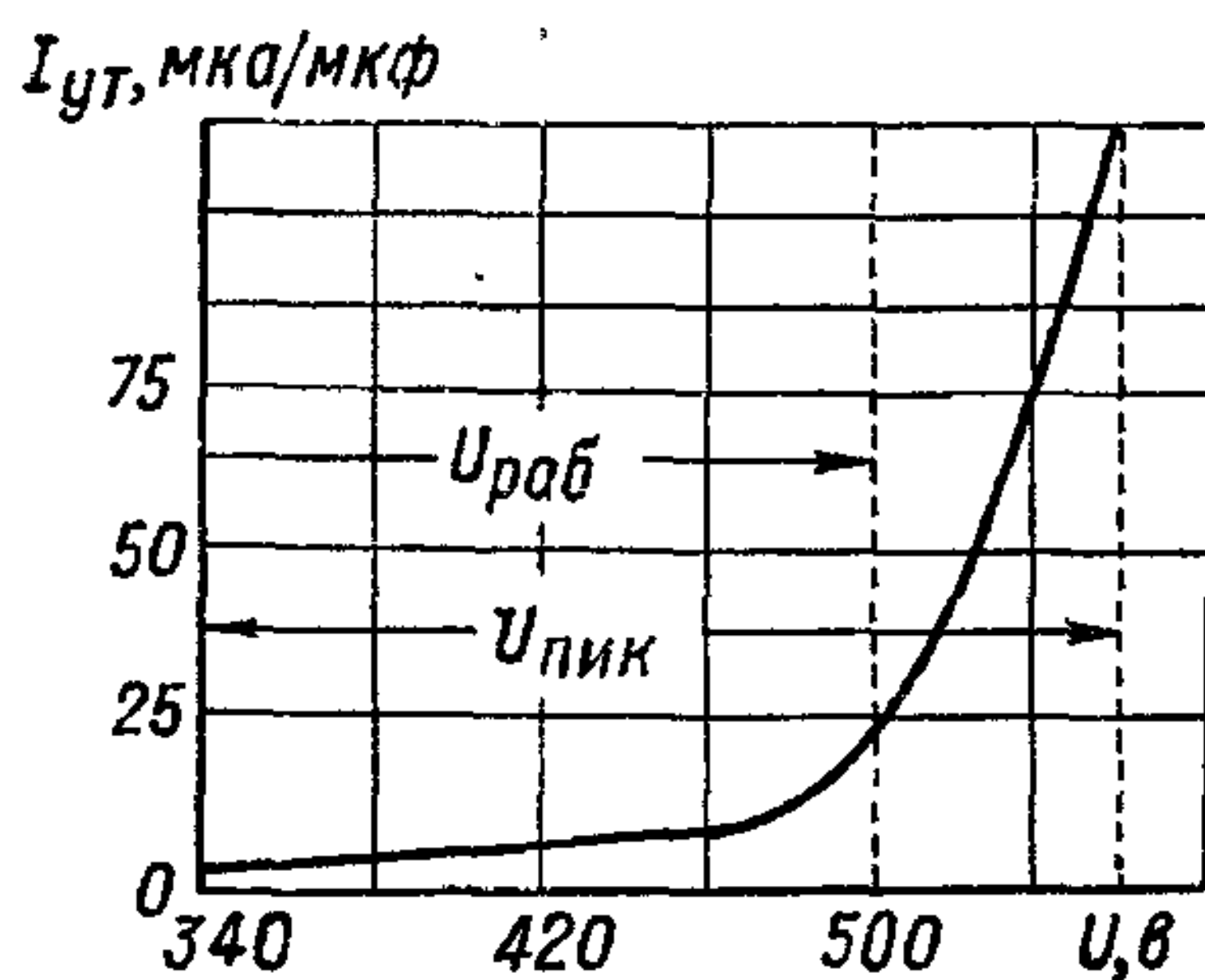


Рис. 282. Зависимость тока утечки сухого алюминиевого конденсатора от напряжения.

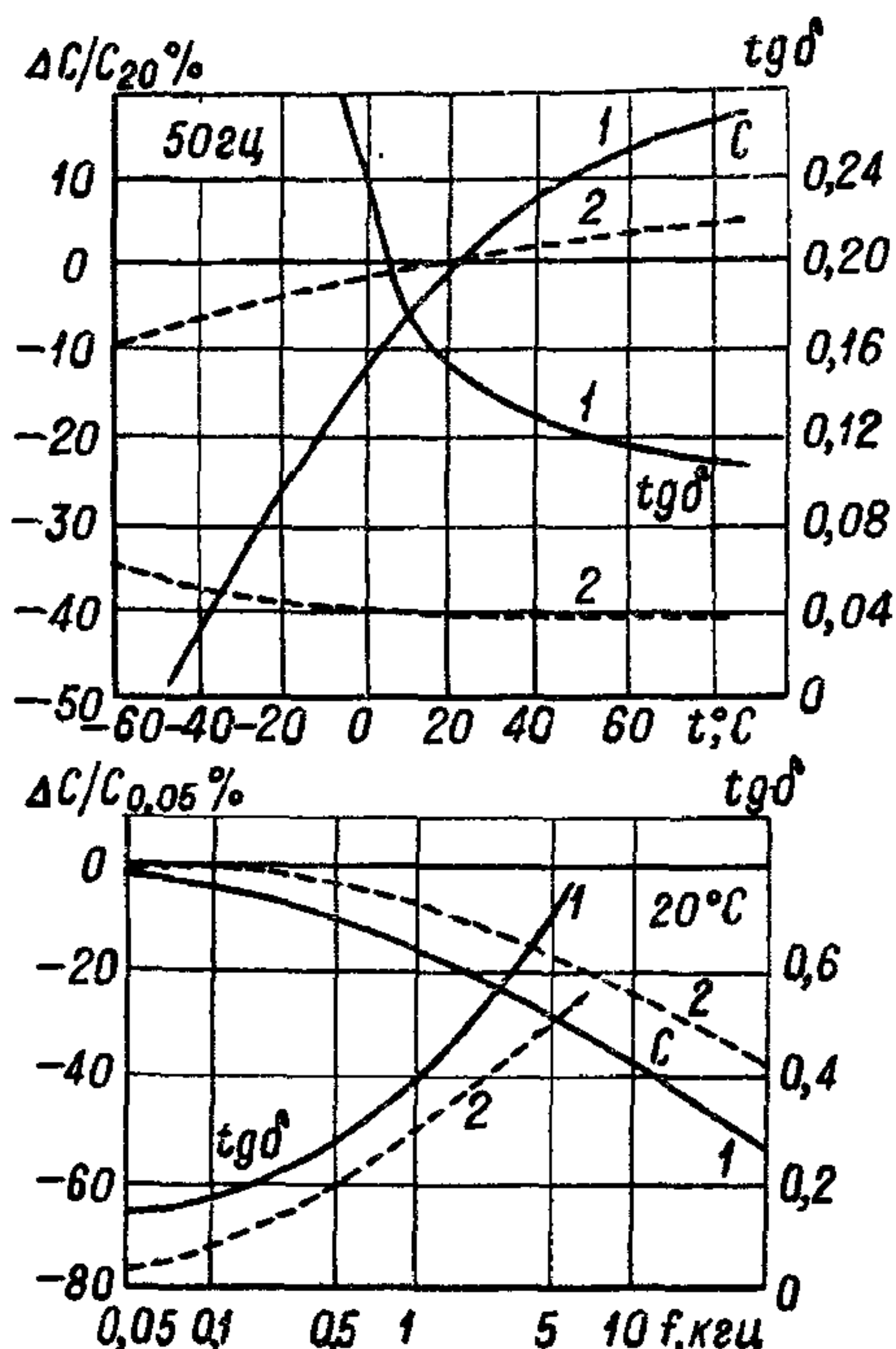


Рис. 283. Сравнение температурно-частотных характеристик для алюминиевых конденсаторов (15 в, 1 мкФ).
1 — сухой конденсатор типа К50-6; 2 — оксидно-полупроводниковый типа К53-8.

зующее допускаемые кратковременные перенапряжения; $U_{\text{пик}}$ лежит между $U_{\text{раб}}$ и U_{ϕ} .

Зависимость емкости и угла потерь сухих алюминиевых конденсаторов от температуры и частоты показана на рис. 283 в виде кривых 1. Некоторые данные об основных отечественных типах сухих алюминиевых конденсаторов в сопоставлении с другими типами электролитических конденсаторов, приведены в табл. 28. Среди этих типов алюминиевых конденсаторов можно отметить конденсаторы серии К50-3, разработанной Воронежским заводом «Электросигнал» и выпускаемой в массовом производстве с значительно лучшими удельными характеристиками, чем у старых конденсаторов серии КЭ. Модификация этой серии К50-3А имеет нижний предел рабочей температуры, сниженный до -60°C ; модификация К50-3Б имеет повышенную надежность (для этой модифи-

Отечественные электролитические конденсаторы

Тип	C _{ном} , мкф	U _{ном} , в	Q _{макс} , мкк	q _{макс} , мкк/см ³	t _{раб} , °C		Металл	Конструкция
					мин.	макс.		
KЭ-ОМ	2—1000	20—450	20 000	86	—60	+60	Al	Уплотненная, сухая
ЭГЦ-ОМ	2—2000	20—450	40 000	178	—60	+60	»	Герметизированная, сухая
KЭ-М	4—2000	8—500	18 000	155	—40	+60	»	Уплотненная, сухая
ЭГЦ-М	2—2000	6—500	40 000	485	—40	+60	То же	
ЭМ	0,5—25	4—60	180	95	—40	+70	»	»
K50-3	1—5000	6—450	30 000	650	—40	+70	»	»
K50-3A	1—1000	12—450	12 000	290	—60	+70	»	»
K50-3Б	2—2000	6—450	12 000	650	—40	+70	»	»
K50-6	1—4000	6—160	100 000	1390	—10	+85	»	»
K50-7	10—600	50—450	140 000	1700	—10	+85	»	»
K50-9	0,5—20	3—6	120	680	—10	+60	»	»
ЭФ	400—1500	300—500	500 000	1030	—10	+40	»	»
K50И-8	500—800	300—400	240 000	1550	—10	+40	»	»
ЭТ	5—500	6—150	3 000	334	—60	+100	Ta	»
ЭТН	6—150	30—100	2 000	222	—60	+100	»	»
ЭТО 1 и 2	10—1000	6—90	10 500	1920	—60	+200	»	Уплотненная жидкая
ЭТО 3 и 4	2—50	150—600	7 500	227	—60	+200	»	То же
K52-1	1,5—100	3—100	770	2700	—60	+85	»	»
K52-2	10—1000	6—90	10 350	2450	—60	+200	»	»
K52-3	10—1000	6—90	10 000	2350	—60	+200	Ta/Nb	»
K52-4A	0,1—10	3—50	117	3150	—40	+70	Ta	»
K53-1	0,033—1000	6—30	930	1530	—60	+85	»	Герметизированная, твердая
K53-4	0,47—100	6—20	1 010	1590	—60	+85	Nb	То же
K53-8	0,5—20	1,5—15	30	38,5	—60	+85	Al	Уплотненная, твердая

* См. примечание к табл. 15.

кации надежность равна 0,998, в то время как для К50-3А — 0,99, а для К50-3 — 0,98; (при времени 1000 ч соответствующие значения интенсивности отказов λ составляют: $2 \cdot 10^{-6}$, $1 \cdot 10^{-5}$ и $2 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}$).

Еще лучшие значения удельных характеристик достигнуты в новых сериях К50-6 и К50-7; за счет применения еще более глубокого травления (повышения $k_{\text{тр}}$) и лучшего использования объема корпуса удалось получить такое увеличение удельного заряда, которое приближает эти конденсаторы по объему к танталовым конденсаторам.

Однако при этом пришлось пойти на повышение $t_{\text{мин}}$ от $-(40 \div 60)^\circ \text{С}$ до -10°С , что, впрочем, вполне допустимо для обычной радиоаппаратуры широкого применения; норма на $\text{tg } \delta$ при малых напряжениях расширена от 0,20 до 0,25—0,35. Допускаемый ток утечки вычисляется по формуле

$$I = 0,05CU + K \text{ (мкА)},$$

где C в мкф, U — в в и $K = 3$ для конденсаторов типа К50-6 и 30 для типа К50-7. Допуск по емкости для современных алюминиевых сухих конденсаторов обычного типа $-20 \div +80\%$, для миниатюрных конденсаторов типа К50-9 установлен допуск $-10 \div +100\%$.

Относительно новым применением сухих электролитических конденсаторов является их использование в качестве н а к о п и т е л е й энергии в различных импульсных устройствах. В конденсаторах типа ЭФ, разработанных для использования в фотографической технике, при напряжениях 300—500 в и $C_{\text{ном}} = 400 \div 1500 \text{ мкф}$ были достигнуты удельные характеристики 165—200 дж/л и 8—10 г/дж. В первых сериях этих конденсаторов наблюдалось явление постепенного снижения емкости с увеличением числа циклов разряд — разряд, которым подвергался конденсатор. Это объяснялось образованием оксидного слоя на катодной фольге (з а ф о р м о в к о й к а т о д а) за счет толчков разрядного тока. Снижение емкости после нескольких тысяч циклов могло достигать 40—50%. Это явление было исключено применением свинцово-оловянной катодной фольги. В настоящее время предложен более дешевый способ — использование алюминиевой фольги, покрытой проводящим лаком, который, кроме того, исключает нежелательное увеличение веса при замене алюминия свинцово-оловянной фольгой. В новой серии накопительных конденсаторов К50И-8 усовершенствование конструкции и увеличение $k_{\text{тр}}$ позволило довести удельную энергию до 230—255 дж/л и удельный вес — до 6—7 г/дж.

Н е п о л я р н ы е алюминиевые сухие конденсаторы находят себе применение для пуска однофазных электродвигателей (см. рис. 27, C_2) и рассчитаны на кратковременное включение в цепь переменного тока при частоте 50 гц. Конденсаторы типа ЭП (пусковые) выпускаются с номинальным напряжением 175 в (5—100 мкф) и 300 в (1,5—30 мкф) и соответственно имеют опти-

мальные значения удельной емкости 0,8 и 0,17 мкф/см³. Они рассчитаны на 20—30 включений по 3 сек в час при окружающей температуре $-40 \div +60^{\circ}\text{C}$; допуск по емкости $\pm 20\%$; $\text{tg } \delta$ — не выше 0,08. После работы в течение 12 ч при 60°C изменение емкости — не более 50%.

Совершенно новым типом алюминиевого электролитического конденсатора является оксидно-полупроводниковый алюминиевый конденсатор, в котором прокладка с электролитом заменена тонким слоем полупроводника MnO_2 , нанесенным непосредственно на оксидный слой. Для изготовления анода используют алюминиевую фольгу (99,99% Al) толщиной 200 мкм, которую нарезают на пластинки размером 10×10 мм с отводной полоской. Для увеличения удельной поверхности фольга предварительно подвергается травлению электрохимическим способом. Нанесение оксидного слоя на аноды производится в растворе лимонной кислоты и буры. Полупроводниковый катод наносится путем «пропитки» формованного анода в водном растворе азотнокислого марганца и последующего термического разложения последнего, согласно реакции



Образующиеся при реакции пары двуокиси азота в присутствии паров воды повреждают оксидную пленку на аноде, увеличивая ток утечки. Поэтому полезна предварительная подсушка «пропитанных» анодов перед проведением операции пиролизического разложения азотнокислого марганца. В одном из опытов введение такой подсушки позволило снизить ток утечки с 17 до 5 мка. После подсушки процесс пиролиза производится при 400°C . При выборе режима подсушки надо иметь в виду, что до 80°C могут удаляться лишь пары воды, в пределах $80\text{—}180^{\circ}\text{C}$ удаляется вода и окислы азота, а при температуре выше 180°C — только окислы азота. Следует иметь в виду, что написанная выше реакция несколько упрощена, точнее писать $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, где $x = 4 \div 7$; кроме NO_2 может также выделяться NO.

В процессе пиролиза оксидный слой повреждается даже при подсушке, поэтому после пиролиза приходится производить дополнительную подформовку анода в том же электролите. Обычно операции пропитки, пиролиза и подформовки производят несколько раз. Поверх слоя MnO_2 наносят слой графита, а на него — слой припоя ПОС (рис. 268, г), к которому затем припаивают

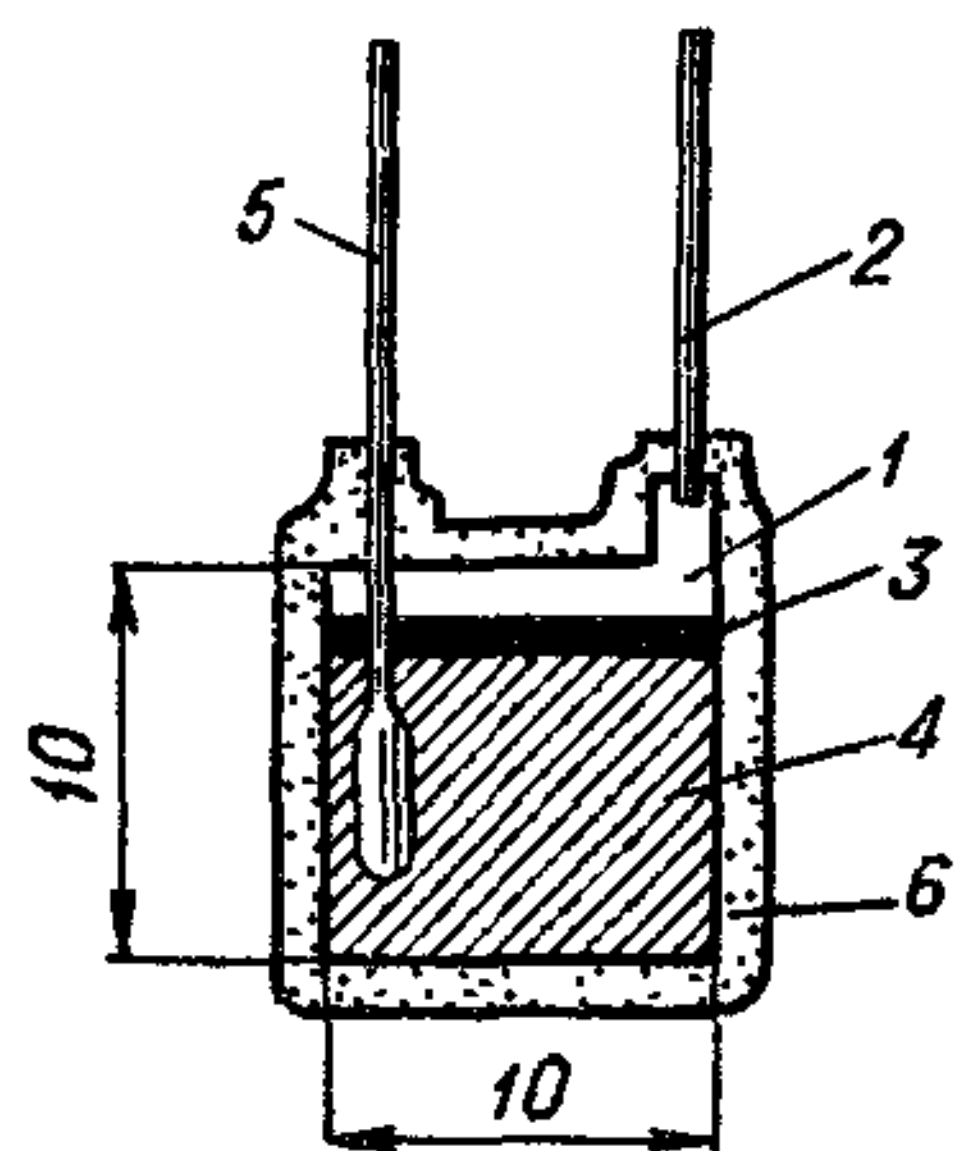


Рис. 284. Схема устройства алюминиевого оксидно-полупроводникового конденсатора.

1 — алюминиевый оксидированный анод; 2 — анодный вывод; 3 — край слоя графита; 4 — металлический слой, нанесенный поверх графитового; 5 — катодный вывод; 6 — слой влагонепроницаемого компаунда.

катодный вывод. После этого конденсатор защищают от влаги, покрывая его поверхность эпоксидным компаундом (рис. 284). Размеры готового конденсатора $15 \times 13 \times (3 \div 4)$ мм, обозначение К53-8. Номинальное напряжение от 1,5 до 15 в при $C_{\text{ном}}$ от 20 до 0,5 мкф. Для этих конденсаторов характерно высокое значение отношения $U_{\text{ф}}$ к $U_{\text{ном}}$, порядка 5—6 раз вместо 1,15—1,5, как для обычных конденсаторов. Температурно-частотные характеристики оксидно-полупроводникового конденсатора показаны на рис. 283 в виде кривых 2. Рабочая температура: $-60 \div +85^\circ \text{C}$. Зависимость тока утечки от напряжения при разных значениях $U_{\text{ф}}$ приведена на рис. 285. Максимальный заряд этих конденсаторов составляет 30 мкк, и наибольшее значение удельного заряда равно $38,5 \text{ мкк/см}^3$. Угол потерь заметно снижен по сравнению

$I_{\text{ут}}, \text{мкА}$

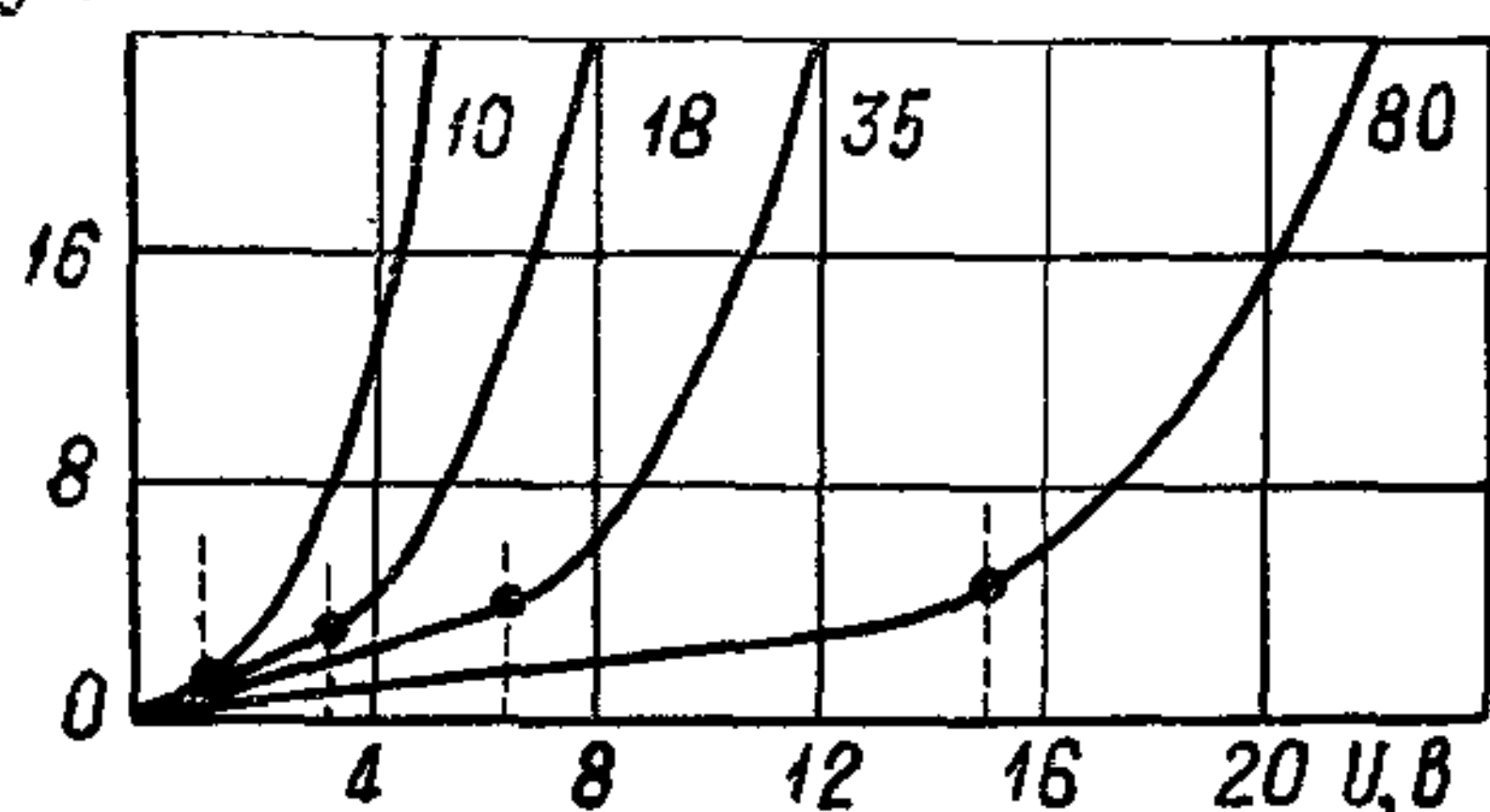


Рис. 285. Зависимость тока утечки конденсатора К53-8 от напряжения при разных напряжениях формовки (цифры у кривых); пунктиром указаны значения рабочих напряжений.

конденсаторов в корпусах с размерами $\phi(6,4 \div 10) \times 20,5$ мм получен заряд 160—500 мкк и удельный заряд до 300 мкк/см^3 . Наибольшее напряжение 25 в.

В Венгрии были проведены опыты по получению алюминиевых оксидно-металлических конденсаторов (см. рис. 268, б) путем напыления в вакууме алюминиевых электродов площадью $0,26 \text{ см}^2$ на алюминиевый оксидированный анод, формованный при различных напряжениях. В зависимости от $U_{\text{ф}}$ были получены следующие значения емкостей: 0,015 мкф при 60 в; 0,03 мкф при 30 в; 0,1 мкф при 10 в и 0,3 мкф при 3 в. При 20°C и частоте 1 кГц $\text{tg } \delta = 45 \div 50 \cdot 10^{-4}$; при 100°C $\text{tg } \delta$ увеличивается в 1,5 раза, а при 10 кГц — в 2 раза. В пределах температуры от -40 до $+120^\circ \text{C}$ величина $\text{TKE} = +490 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; при изменении частоты от 0,3 до 10 кГц снижение емкости составляет около 1%. Конденсаторы, формованные при $U_{\text{ф}} = 60$ в успешно выдержали испытание при $U_{\text{раб}} = 6$ в и 85°C в течение 1000 ч. Конденсаторы такого типа могут представить интерес для применения в микроминиатюрной аппаратуре в основном в качестве одного из элементов плоских схем.

с сухими конденсаторами: $\text{tg } \delta = 0,04 \div 0,05$.

За рубежом выпускаются также намотанные алюминиевые оксидно-полупроводниковые конденсаторы с расширенными номинальными данными. По конструкции они подобны сухим конденсаторам, но вместо бумажной прокладки в них использована лента стеклоткани, пропитываемая затем азотно-кислым марганцем, который также разлагают пиролизически для получения MnO_2 . Для таких

§ 89. Танталовые электролитические конденсаторы

Тантал был опробован в качестве вентильного металла сравнительно давно, еще в 30-х годах, но в то время не было оценено его преимущество перед алюминием; дороговизна и дефицитность тантала воспрепятствовали тогда его практическому применению. Только в последние годы было показано, что этот металл позволяет настолько улучшить характеристики электролитических конденсаторов, что несмотря на высокую стоимость танталовых конденсаторов и трудность получения нужных количеств тантала для их производства, подобные конденсаторы все же есть смысл изготовлять, во всяком случае для аппаратуры специального назначения. В связи с этим производство танталовых конденсаторов было освоено как в СССР, так и в ведущих капиталистических странах.

Танталовые сухие конденсаторы по конструкции подобны сухим алюминиевым конденсаторам. Повышенная механическая прочность тантала (табл. 27) позволяет использовать фольгу с резко уменьшенной толщиной (10—12 *мкм*), что отчасти компенсирует сильно увеличенный удельный вес тантала по сравнению с алюминием. Повышенная, более чем в 2 раза ϵ оксида тантала по сравнению с ϵ для Al_2O_3 и уменьшенная толщина фольги привели к заметному снижению удельного объема танталовых конденсаторов по сравнению с сухими алюминиевыми с гладким анодом. Однако глубокое травление позволяло алюминию обогнать тантал в этих конденсаторах по удельным характеристикам. Высокая химическая стойкость Та препятствовала его травлению для увеличения удельной поверхности. Однако теперь подобраны рецептуры травящих растворов, позволяющих травить танталовую фольгу (например, раствор трехфтористого уксуснокислого натрия CF_3COONa в бутиловом спирте). Величина $k_{\text{тр}}$ меньше, чем в случае алюминия, и при верхнем пределе $U_{\text{ф}}$ не превышает $2 \div 3$, а при нижнем — $7 \div 10$. Применение травленной танталовой фольги позволило дополнительно снизить размеры танталовых сухих конденсаторов. Верхний предел $U_{\text{ф}}$ у тантала ниже, чем у алюминия, что ограничивает верхний предел $U_{\text{ном}}$ значениями: 150 *в* при 85°C ; 120 *в* при 100°C и 100 *в* при 125°C . Для отечественных танталовых сухих конденсаторов типа ЭТ рабочий интервал температур составляет: $-60 \div 100^\circ \text{C}$ (за рубежом некоторые фирмы дают: $-55 \div +125^\circ \text{C}$). Танталовая фольга для анодов содержит 99,92—99,94% Та; в качестве катода применяют танталовую или ниобиевую фольгу. Прокладка — конденсаторная бумага 12 *мкм*, пропитанная электролитом с пониженным удельным сопротивлением, например, на основе раствора LiCl в этиленгликоле. Снижение $r_{\text{эл}}$ позволяет заметно улучшить температурно-частотные характеристики танталовых конденсаторов по сравнению с обычными сухими алюминиевыми конденсаторами (рис. 286).

Преимуществом также является практическое отсутствие явления расформовки при длительном хранении вследствие большой химической устойчивости Ta_2O_5 . Норма на ток утечки дается выражением

$$I = kCU \text{ (мкА)}, \quad (293)$$

где $k = 0,05$ при $25^\circ C$; $0,25$ при $85^\circ C$ и $0,35$ при $100^\circ C$. При номинальных данных: $C = 10 \text{ мкФ}$ и $U = 100 \text{ В}$ и при $20^\circ C$ ток утечки $I = 0,05 \cdot 10 \cdot 100 = 50 \text{ мкА}$; это дает постоянную времени $RC = 20 \text{ сек}$ при $20^\circ C$ и порядка 3 сек при $100^\circ C$. Сухие танталовые конденсаторы выпускаются и неполярного типа (рис. 268, в) под маркой ЭНТ (табл. 28).

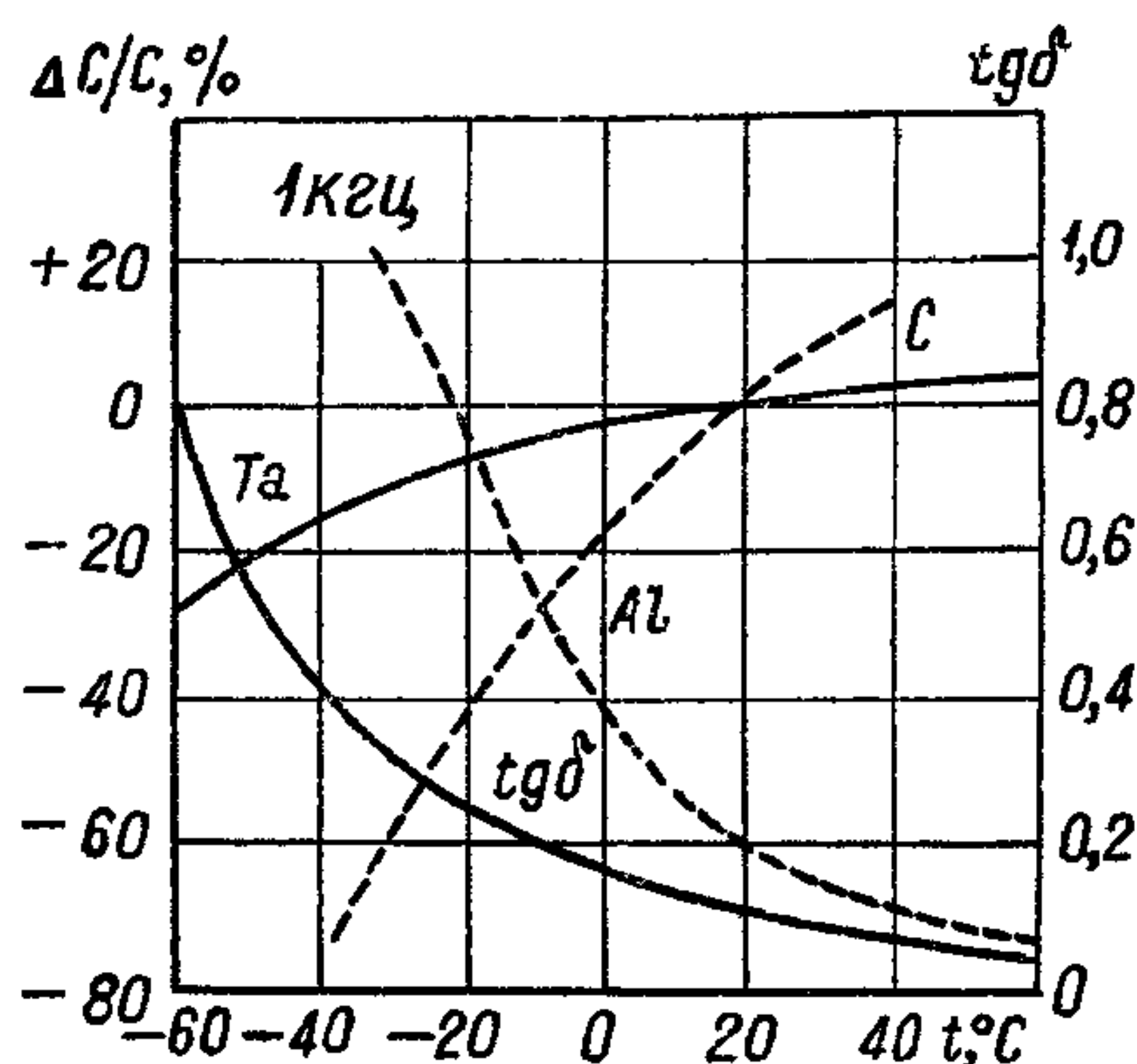


Рис. 286. Сравнение температурных зависимостей при повышенной частоте для танталового и алюминиевого сухих американских конденсаторов.

Разработка нового электролита для алюминиевых конденсаторов (§ 88), позволяющего расширить их температурный интервал до $-60 \div +125^\circ C$ и приближающего их характеристики к танталовым конденсаторам, позволит заменять во многих случаях танталовые сухие конденсаторы алюминиевыми с новым электролитом, получая экономию дефицитного тантала.

Жидкостные танталовые конденсаторы были разработаны применительно к использованию

пористых анодов, полученных спеканием из танталового порошка; такие аноды называют также **объемно-пористыми**, в связи с чем жидкостные конденсаторы получили у нас название **ЭТО** (Электролитический танталовый с объемно-пористым анодом). При малых значениях емкости жидкостные конденсаторы изготовляют также с анодами из проволоки, скрученной в виде цилиндрической спирали.

Объемно-пористые аноды прессуют из танталового порошка, обычно применяя связку (камфору, раствор парафина в бензине и т. п.), при давлениях порядка $250 \div 800 \text{ кг/см}^2$, а затем спекают при высокой температуре в вакууме с таким расчетом, чтобы соединение зерен порошка между собой произошло только в местах контакта между ними с сохранением максимального количества пор между зернами. Иногда перед спеканием производят прогрев при $750^\circ C$ и давлении порядка $10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$ для обезгаживания порошка.

Представляя себе зерна порошка в виде шариков одинакового диаметра (рис. 287), расположенных с максимальной плотностью

упаковки, Л. Н. Закгейм¹ получил формулу для расчета емкости формованного объемно-пористого анода:

$$C_A = 0,83 \frac{\varepsilon S h}{r U_{\phi}}, \quad (294)$$

где C_A — емкость анода в мкф , ε — диэлектрическая проницаемость оксида тантала, U_{ϕ} — формовочное напряжение в в , r — радиус зерен порошка в см , h — высота анода («таблетки») в см ; S — площадь сечения анода в см^2 (при диаметре анода D имеем $S = \frac{\pi D^2}{4}$).

Если радиус зерна 40 мкм ($4 \cdot 10^{-3} \text{ см}$), для таблетки высотой $0,15 \text{ см}$ и диаметром $0,5 \text{ см}$ ($S = 0,196 \text{ см}^2$) при формовочном напряжении 25 в и значении $\varepsilon \approx 25$ для Ta_2O_5 находим по формуле (294) $C_A = 6 \text{ мкф}$. Для этих же условий, из опыта, было получено $C_A \approx 5,5 \div 7 \text{ мкф}$. Если бы анод тех же размеров не имел пористости и емкость была бы обусловлена только оксидным слоем на его наружной поверхности, то мы получили бы $C_A = 0,3 \text{ мкф}$. Таким образом, увеличение емкости за счет наличия системы пор в прессованном аноде в данном случае составляет $6 : 0,3 = 20$ раз.

Согласно формуле (294), емкость анода увеличивается с уменьшением радиуса зерна. Однако при использовании мелкозернистых порошков приходится снижать температуру спекания, чтобы избежать сваривания анода в сплошное тело, связанного со снижением пористости и уменьшением емкости. Так например, если при некоторых размерах анода и диаметре частиц порошка $1,5\text{—}2 \text{ мкм}$ расчетное значение емкости составляло 170 мкф , то при температуре спекания 1300°C было получено около 163 мкф , при 1400°C емкость снизилась до 115 мкф , а при 1500°C — до 95 мкф . Между тем температуру спекания стремятся довести до 2000°C , чтобы обеспечить максимальное выжигание примесей из тантала. При этой температуре давление паров некоторых элементов, наличие которых возможно в танталовом порошке, составляет (в $\text{мм рт. ст.} \times 10^{-6}$):

Ca	Mn	Al	Sn	Cr	Fe	Ni	Ti
40 000	6000	600	250	100	40	30	2

¹ Л. Н. Закгейм. ЖТФ, 1957, том 27, № 8.

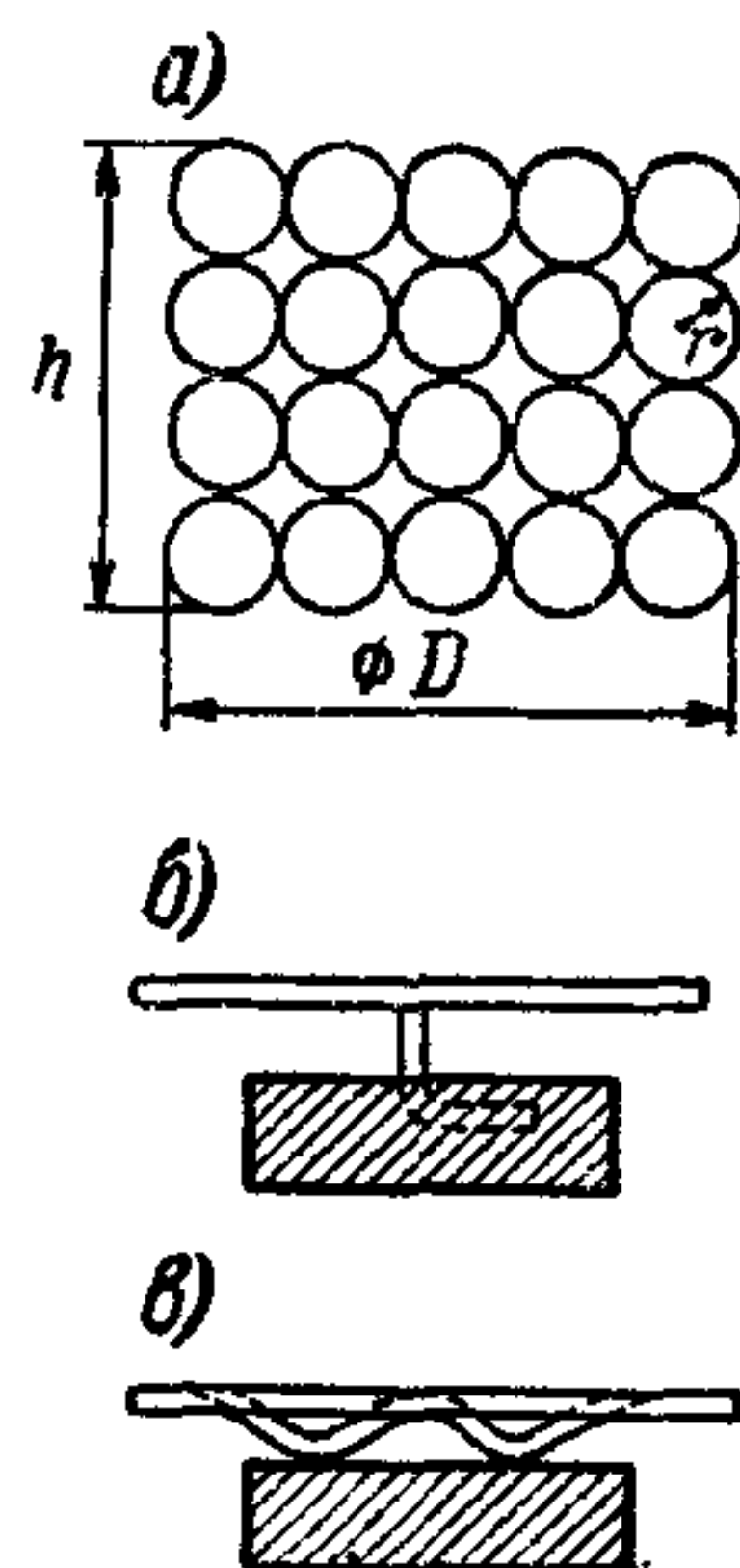


Рис. 287. Объемно-пористые танталовые аноды: а — схема к расчету емкости анода; б — крепление анода на проволоочном крючке, приваренном к танталовой пластинке («крышке»); в — крепление анода приваркой к выступам на пластинке («пуклевкам»).

Эти цифры показывают, что если вести спекание прессованных анодов при 2000°C и остаточном давлении порядка 10×10^{-6} мм рт. ст., то кроме титана все остальные примеси должны удалиться. Действительно, если в исходном порошке количество примесей составляет $1 \div 20 \cdot 10^{-2}\%$, то после спекания при 2000°C даже при остаточном давлении порядка 10^{-4} мм рт. ст. (т. е. $100 \cdot 10^{-6}$ мм) количество примесей снижается до $15 \div 20 \cdot 10^{-4}\%$, т. е. примерно в 100 раз. Для того чтобы обеспечить возможность вести спекание при максимальной допустимой температуре, надо использовать крупнозернистые порошки, хотя при этом и снижается расчетное значение емкости анода. Обычно используют порошки, содержащие зерна различной крупности: например, 40—50% с диаметром 3—30 мкм, 40—50% с диаметром 30—60 мкм и 5—10% с диаметром 60—90 мкм. При оценке примесей, содержащихся в танталовом порошке, следует иметь в виду, что среди них хуже других удаляется при спекании углерод; в связи с этим при повышенном содержании С целесообразно вводить в порошок кислород в виде летучих окислов, которые вызовут окисление углерода в процессе спекания анодов и его удаление в виде СО. Повышение чистоты танталового порошка допускает снижение температуры спекания и применение мелкозернистых порошков, позволяющих повысить удельную емкость прессованных анодов.

Для крепления анодной таблетки в конденсаторе ранее в нее вводили отрезок танталовой проволоки, который приваривался далее к танталовой пластинке; теперь для увеличения механической надежности в пластинке выдавливаются три «пуклевки», к которым в трех точках приваривается таблетка (рис. 287, б и в).

Для создания оксидного слоя на тантале анодные таблетки собираются в рамках по несколько десятков или сотен штук и опускаются в формовочную ванну. Обычный формовочный электролит — 70%-ный раствор H_2SO_4 в воде с удельным сопротивлением менее 1 ом · см; искровое напряжение выше 100 в, температура кипения 169°C . Формовку ведут обычно при температурах порядка 150°C и токе 5—15 а на каждый анод. Продолжительность формовки 10—20 ч. После формовки аноды тщательно промываются, сушатся и направляются на сборку. Иногда для формовки вместо H_2SO_4 применяют также раствор ортофосфорной кислоты.

Конструкция жидкостного конденсатора типа ЭТО показана на рис. 288. Применение агрессивного рабочего электролита заставляет использовать двойной корпус: внутренний тонкостенный серебряный и наружный стальной для получения механической прочности. Большое внимание приходится уделять уплотнению конструкции для предупреждения возможности утечки электролита. В качестве рабочего электролита обычно применяют водный 35—38%-ный раствор H_2SO_4 , имеющий $\rho \approx 1,2$ ом · см при 20°C и 28—30 ом · см при -60°C . Были предложены также менее агрессивные электролиты, но они имеют большее удельное сопротивление: раствор H_3PO_4 — 4,8 ом · см и раствор LiCl — 12 ом · см.

При повышенном ρ ухудшаются температурно-частотные характеристики конденсатора.

Жидкостные танталовые конденсаторы с объемнопористыми анодами позволили получать рекордные значения удельных характеристик: удельный заряд до 2000—3000 мкк/см³ и удельную емкость при напряжении 10 в порядка 200—300 мкф/см³. При использовании особо чистых порошков с уменьшенными размерами зерен можно повысить удельный заряд до 5000—6000 мкк/см³. Большая емкость анода может давать и нежелательные последствия в виде усиления влияния катодной емкости. Действительно, если на катоде (серебряном корпусе) возникает тонкий диэлектрический слой, то его емкость C_K включается последовательно с емкостью анода C_A . В этом случае общая емкость конденсатора будет равна:

$$C = \frac{C_A C_K}{C_A + C_K} = \frac{C_A}{1 + C_A/C_K}. \quad (295)$$

Как следует из формулы (295), при больших значениях C_A требуется сильно увеличивать C_K (т. е. $C_K \gg C_A$), чтобы не снижать общую емкость. Особенно чувствуется этот эффект при увеличении номинальной емкости и общих размеров конденсаторов, так как емкость C_A возрастает пропорционально кубу размеров, а емкость C_K — пропорционально квадрату размеров, а следовательно, отношение C_A/C_K увеличивается и общая емкость снижается. Для увеличения C_K оказывается необходимым увеличивать внутреннюю поверхность серебряного корпуса, делая ее шероховатой тем или иным способом. Это особенно необходимо при малых номинальных напряжениях и больших размерах конденсатора, как показывают приведенные ниже цифры (высота анода 3 мм):

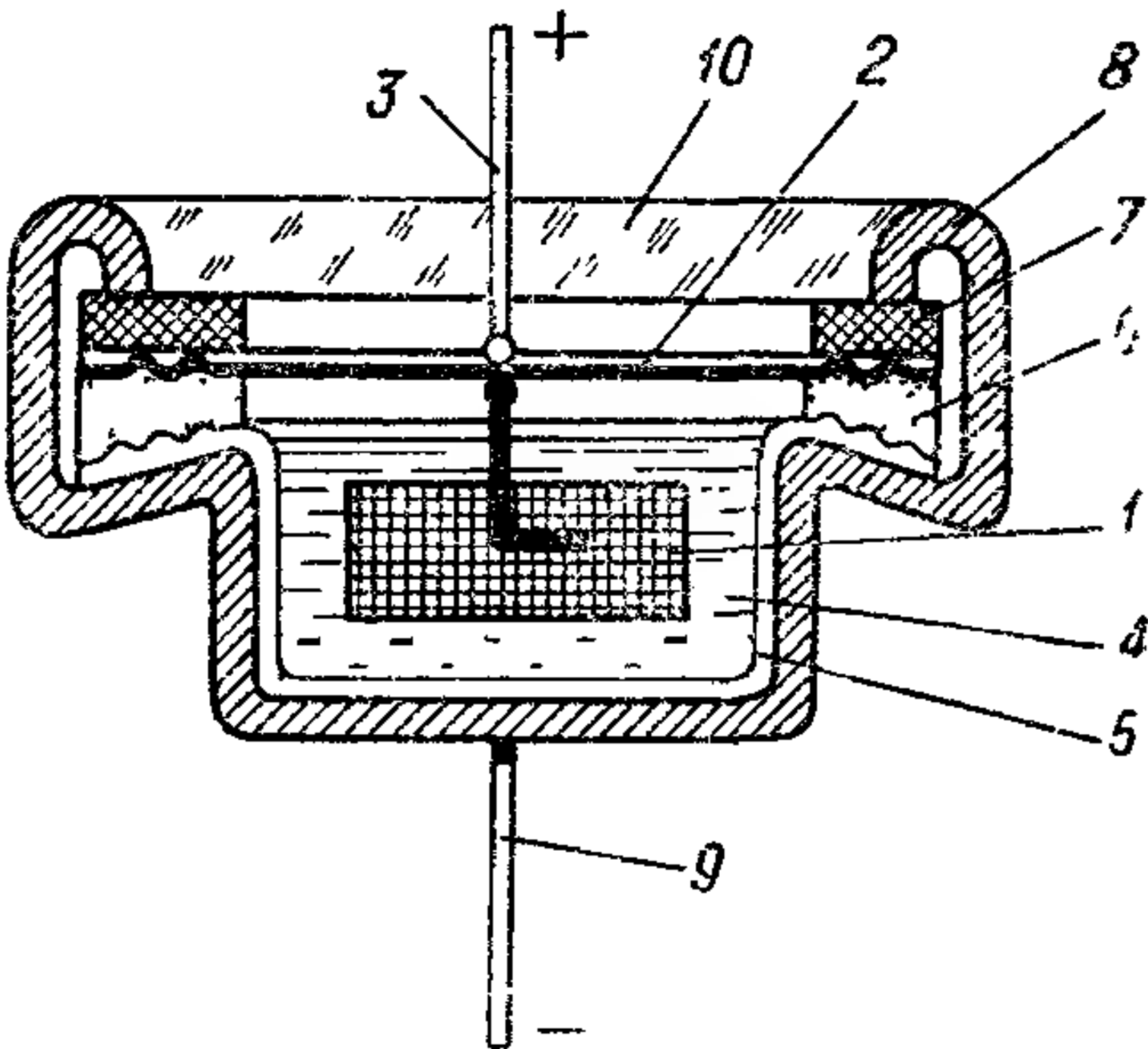


Рис. 288. Конструкция жидкостного электролитического танталового конденсатора с объемнопористым спеченным анодом типа ЭТО.

1 — анод; 2 — танталовая крышка; 3 — анодный вывод; 4 — электролит; 5 — серебряный корпус; 6 — упругая прокладка; 7 — изоляционная прокладка; 8 — стальной корпус; 9 — катодный вывод; 10 — заливка эпоксидной смолой.

Диаметр анода, мм	Емкость конденсатора, мка			
	при $U_{ном} = 7 \text{ в}$		при $U_{ном} = 90 \text{ в}$	
	Гладкий катод	Шерохова- тый катод	Гладкий катод	Шерохова- тый катод
4,5	115	156	12,1	12,4
14,6	460	830	80	86

Для увеличения внутренней поверхности корпуса последний покрывают его платиновой чернью, слоем палладия и т. п. После сборки конденсатора, заливки в него рабочего электролита (при точной его дозировке) и завальцовки корпуса производится вторичная формовка конденсаторов. Для этой цели к конденсаторам прикладывается постоянное напряжение, которое постепенно поднимается до $U_{\text{ном}}$ при поддержании постоянства силы тока порядка 1—10 ма (в зависимости от размеров конденсатора); при $U_{\text{ном}}$ конденсаторы выдерживают 2—5 ч при 20° С и 6—8 ч при 100° С.

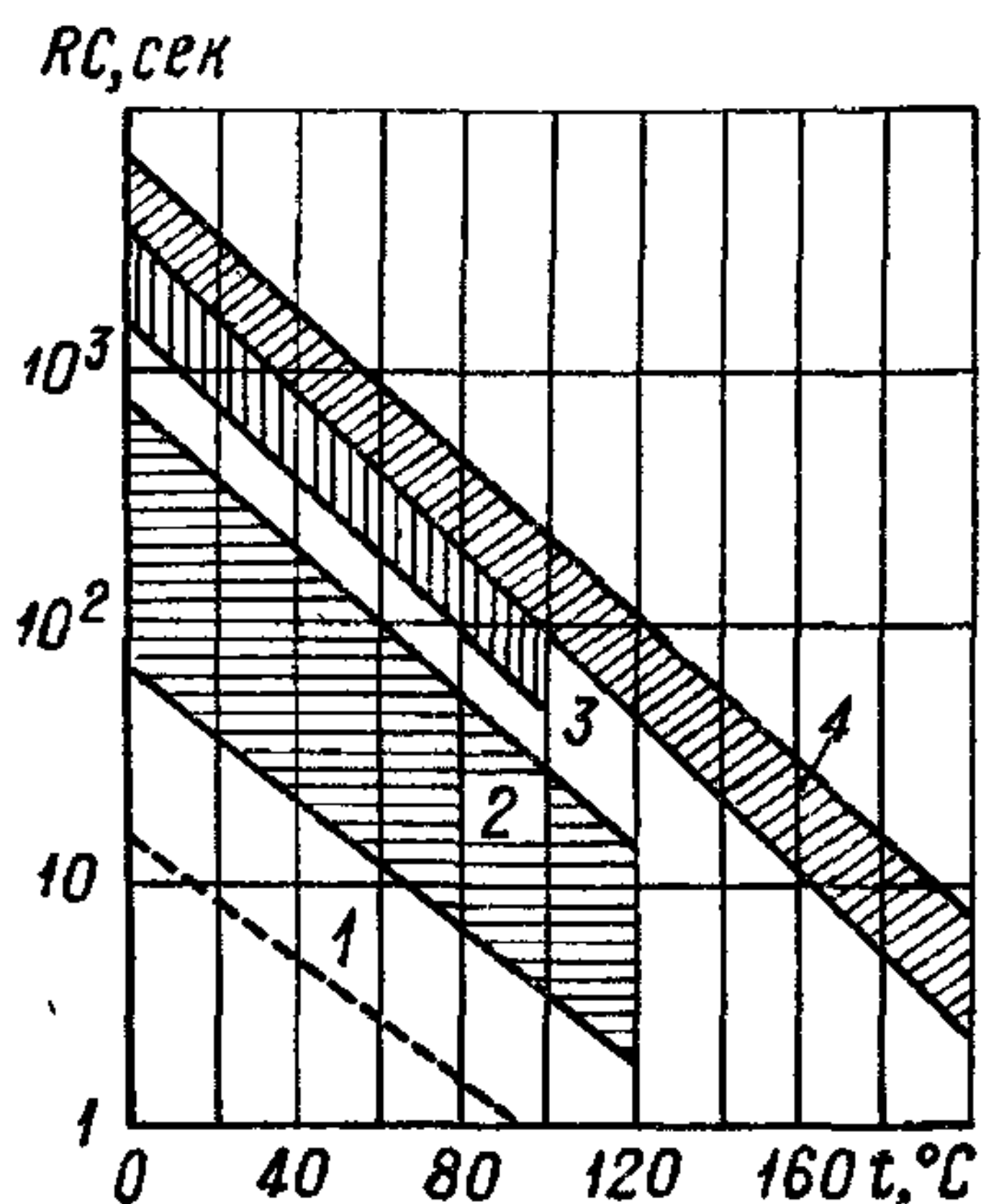


Рис. 289. Зависимость постоянной времени электролитических конденсаторов от температуры.

1 — норма на сухие алюминиевые конденсаторы; 2 — разброс значений для танталовых сухих; 3 — разброс значений для танталовых твердых; 4 — разброс значений для танталовых жидкостных.

Верхний предел рабочего напряжения жидкостных конденсаторов не превышает 100—125 в, так как используемые электролиты имеют относительно невысокое напряжение искрения U_0 . При необходимости получить более высокое $U_{\text{раб}}$ производится последовательное соединение нескольких конденсаторов, поставленных вертикально один на другой и помещенных в общий цилиндрический корпус; при этом напряжение на каждом из последовательно включенных элементов берется равным 90—100 в (ЭТО 3 и 4, см. табл. 28).

Благодаря тому, что спекание анодов производится при высокой температуре, способствующей выгоранию примесей, содержащихся в тантале, ток утечки конденсаторов мал и постоянная времени необычно велика для электролитических конденсаторов (рис. 289), приближаясь к постоянной времени для металлобумажных конденсаторов и даже превышая ее при высоких температурах.

Это позволяет не только получать для жидкостных танталовых конденсаторов рекордные значения $q_{\text{уд}}$, но и расширить температурный интервал их работы до $-60 \div +200^\circ \text{C}$ (при температуре 200° С рабочее напряжение снижается в 2,5—3 раза по сравнению с $U_{\text{ном}}$, установленным при +70° С, и оговаривается сокращенный срок службы). Поведение этих конденсаторов при низких температурах более устойчиво, чем у обычных алюминиевых сухих конденсаторов, хотя наличие электролита дает заметное снижение емкости и увеличение угла потерь при -60°C , особенно при повышенной частоте (рис. 290).

Допуск по емкости для танталовых конденсаторов типа ЭТО составляет: ± 10 , 20 и 30%, иногда до $-20 \div +50\%$. Теперь, наряду с ЭТО, начат выпуск новых типов жидкостных конденсаторов (табл. 28). Сочетание рекордных удельных характеристик и малых

размеров с резко расширенным температурным интервалом, ставящим танталовые жидкостные объемнопористые конденсаторы на один уровень с намотанными фторопластовыми конденсаторами и некоторыми специальными типами керамических конденсаторов, делает их применение в некоторых случаях незаменимым, несмотря на дороговизну и дефицитность тантала.

Танталовые оксидно-полупроводниковые конденсаторы («твердые») явились первым типом

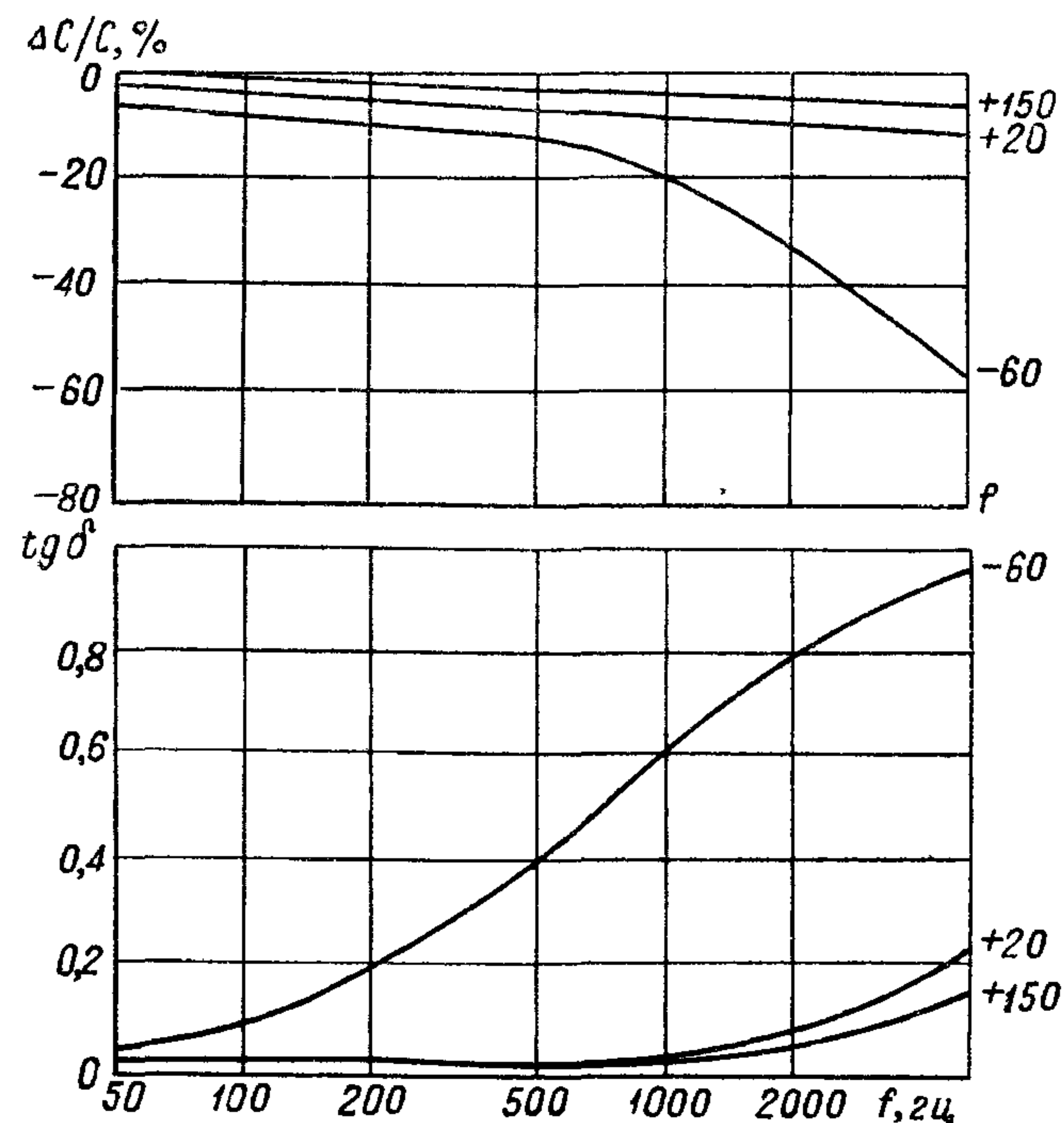


Рис. 290. Частотные характеристики танталового жидкостного конденсатора с объемнопористым анодом при трех значениях температуры (указаны цифрами у кривых).

электролитического конденсатора, на котором была продемонстрирована возможность замены электролита твердым электронным полупроводником. Как было показано выше, эта идея применяется теперь и на других типах вентильных металлов, включая алюминий. Интересно отметить, что из всего многообразия возможных типов полупроводников во всех странах, изготавливающих названные конденсаторы, остановились на одном — двуокиси марганца MnO_2 , хотя опробовались и многие другие варианты. При изготовлении подобных конденсаторов тантал применяется или в виде проволоки (емкость от 0,033 до 1 мкф) или в виде спеченных объемнопористых анодов (емкость от 1 до 300 мкф) (рис. 291). Схема технологии изготовления подобна той, которая описана

выше применительно к алюминиевому «твердому» конденсатору. Пропитка формованных анодов производится 50%-ным водным раствором азотнокислого марганца и после сушки проводится его

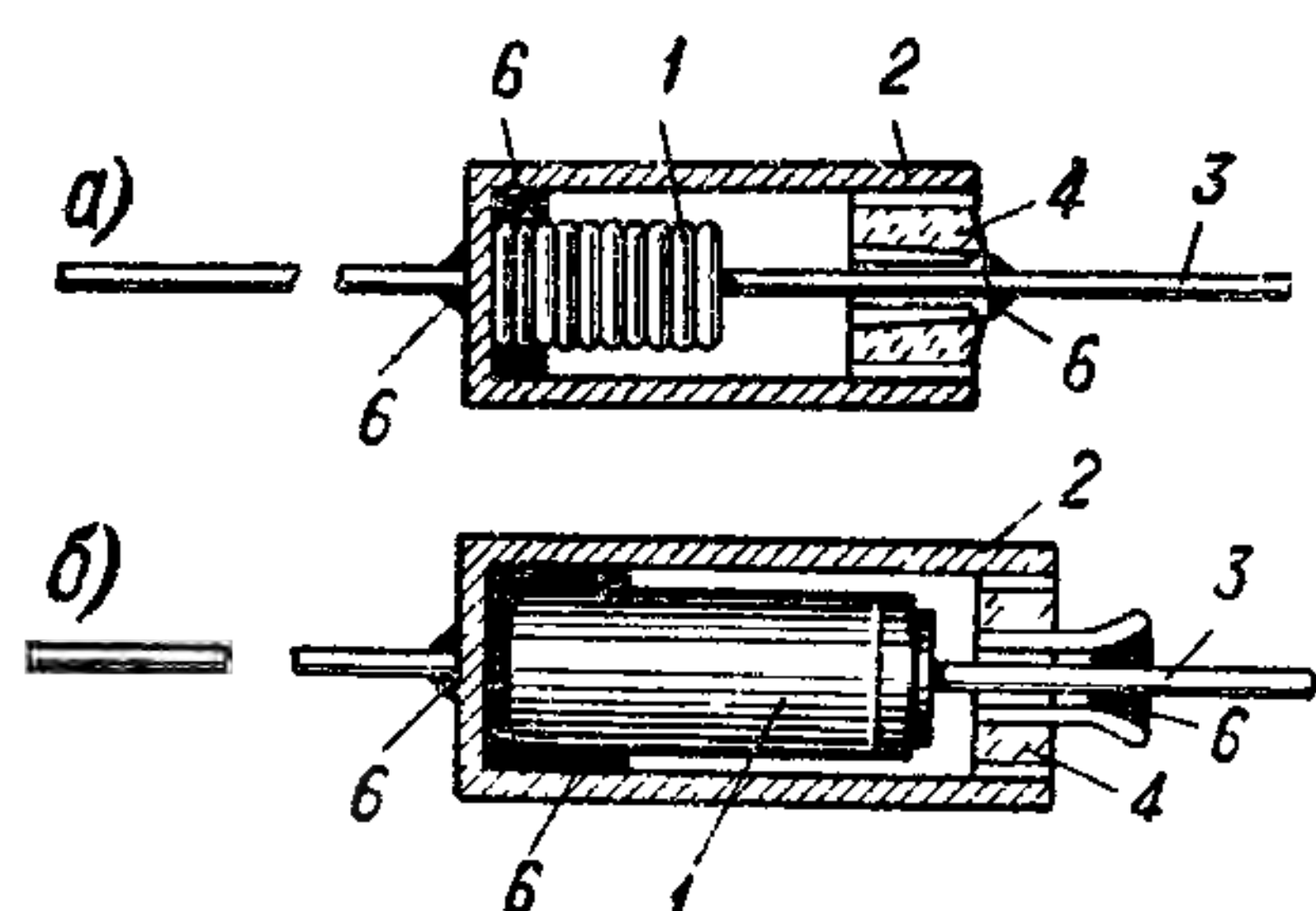


Рис. 291. Окси́дно-полупроводниковые герметизированные конденсаторы с проволочным анодом (а) и с объемнопористым (б).

1 — анод; 2 — корпус; 3 — вывод анода; 4 — стеклянный проходной изолятор; 5 — вывод катода; 6 — припой.

получения слоя MnO_2 удастся заменить химическим способом, не требующим столь высокой температуры и не сопровождающимся выделением агрессивных окислов азота.

Поверх слоя полупроводника наносят слой углерода (графита), используя его водную суспензию («аквадаг»), а на этот слой путем распыления наносят медь или, чаще, припой $Pb + Sn$. Между верхним краем слоя графита и анодным выводом должна при этом оставаться необходимая «закраина». Таким образом, в сравнении с конденсатором жидкостного типа (см. рис. 288) конструкция резко упрощается и по существу определяется только размерами анода и нанесенным на него влагозащитным покрытием, в качестве которого ранее даже пытались ограничиться лакировкой. При этом можно было ожидать, что сокращение размеров конденсатора позволит получить резкое дополнительное улучшение удельных характеристик по сравнению с жидкостным конденсатором; этого, однако, не получилось, так как при формовке анодов «твердых» конденсаторов оказалось необходимым резко увеличить соотношение между формовочным и рабочим напряжением до 3—3,5 раз; соответствующее этому увеличение толщины оксидного слоя снизило удельную емкость анодов по сравнению с жидкостными конденсаторами; кроме того, оказалось необходимым герметизировать

пиролитическое разложение при температуре $400^\circ C$, которая обеспечивает минимальное значение удельного сопротивления MnO_2 (рис. 292). Обычно приходится повторять этот процесс 8—10 раз, применяя после каждых 2—4 операций пиролиза подформовку анодов для исправления дефектов оксидного слоя, вызванных воздействием пиролитического процесса. Это является большим неудобством технологии, а потому проводятся опыты по снижению агрессивности процесса создания слоя полупроводника; можно ожидать, что пиролитический способ

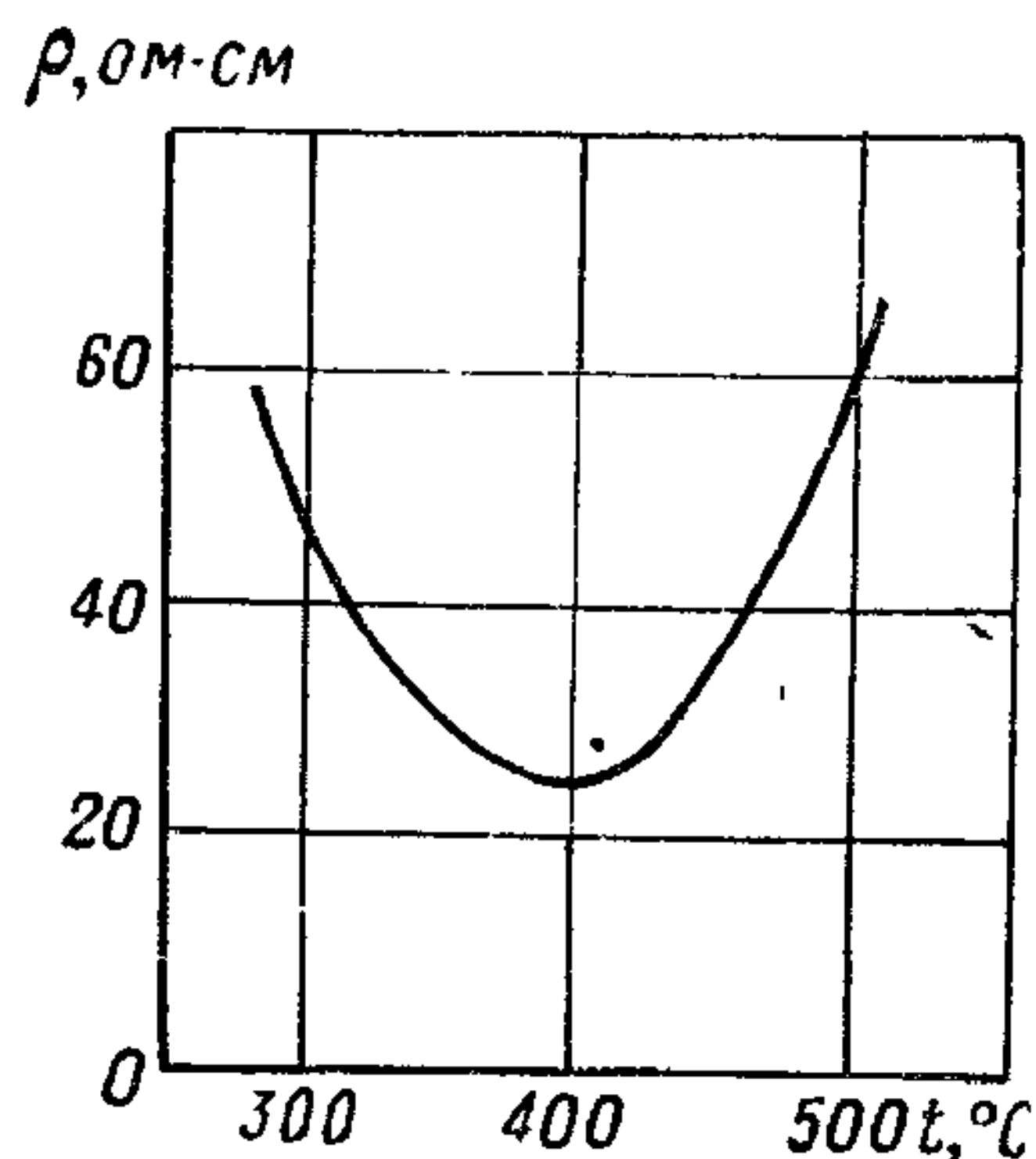


Рис. 292. Зависимость удельного сопротивления двуокиси марганца от температуры пиролиза.

конструкцию «твердых» конденсаторов, что также дало ухудшение удельных характеристик. Под действием влажности емкость незащищенного конденсатора возрастает, но снижается до исходного значения после сушки. Герметизация способствует стабилизации величины емкости, а также и тока утечки. Как уже отмечалось, основным преимуществом «твердых» конденсаторов является расширение нижнего предела рабочих температур вплоть до -80°C в связи с принципиальным изменением характера температурных зависимостей (рис. 270 и 293). Верхний предел у этих конденсаторов, наоборот, понижен по сравнению с жидкостными и чаще всего не превышает $+85^{\circ}\text{C}$. Обычные пределы рабочего напряжения от 6 до 35 в, т. е. верхний предел $U_{\text{ном}}$ также снижен по сравнению с жидкостными. Допуск по емкости ± 10 , 20 и 30%, снижение емкости при -80°C до $-(13 \div 15)\%$, повышение при $+85^{\circ}\text{C}$ до $+(12 \div 13)\%$, $\text{tg } \delta \leq 0,06$ при 20°C и 120 гц, ток утечки через 5 мин при $U_{\text{ном}}$ и 20°C — не более 2 мка и при 85°C — не более 10—15 мка. Теперь вместо -80°C обычно указывают -60°C , так как потребность в конденсаторах для более низких температур очень мала.

Некоторые зарубежные фирмы¹ повысили рабочую температуру для танталовых ОП-конденсаторов до $+125^{\circ}\text{C}$ с верхним пределом $U_{\text{ном}}$ при этой температуре, равным 40 в. Имеются сведения о возможности повышения этого предела до 100—125 в. По сообщению фирмы «Муллард», надежность работы танталовых ОП-конденсаторов ниже, чем алюминиевых конденсаторов этого типа (рис. 294, а), т. е. интенсивность отказов выше; при снижении полного сопротивления цепи, в которую включен танталовый ОП-конденсатор, от 3 ом/в к более низким значениям интенсивность отказов резко возрастает (рис. 294, б). Некоторые фирмы отмечают, что повышение $U_{\text{ном}}$ для ОП-конденсаторов до 75—100 в малоцелесообразно, так как основное их применение — полупроводниковая аппаратура, где такие напряжения не требуются.

Оксидно-полупроводниковые конденсаторы по своим температурно-частотным характеристикам при малых емкостях и по величине $\text{tg } \delta$ приближаются к пленочным конденсаторам с полярным диэлектриком, отличаясь от них значительно улучшенными

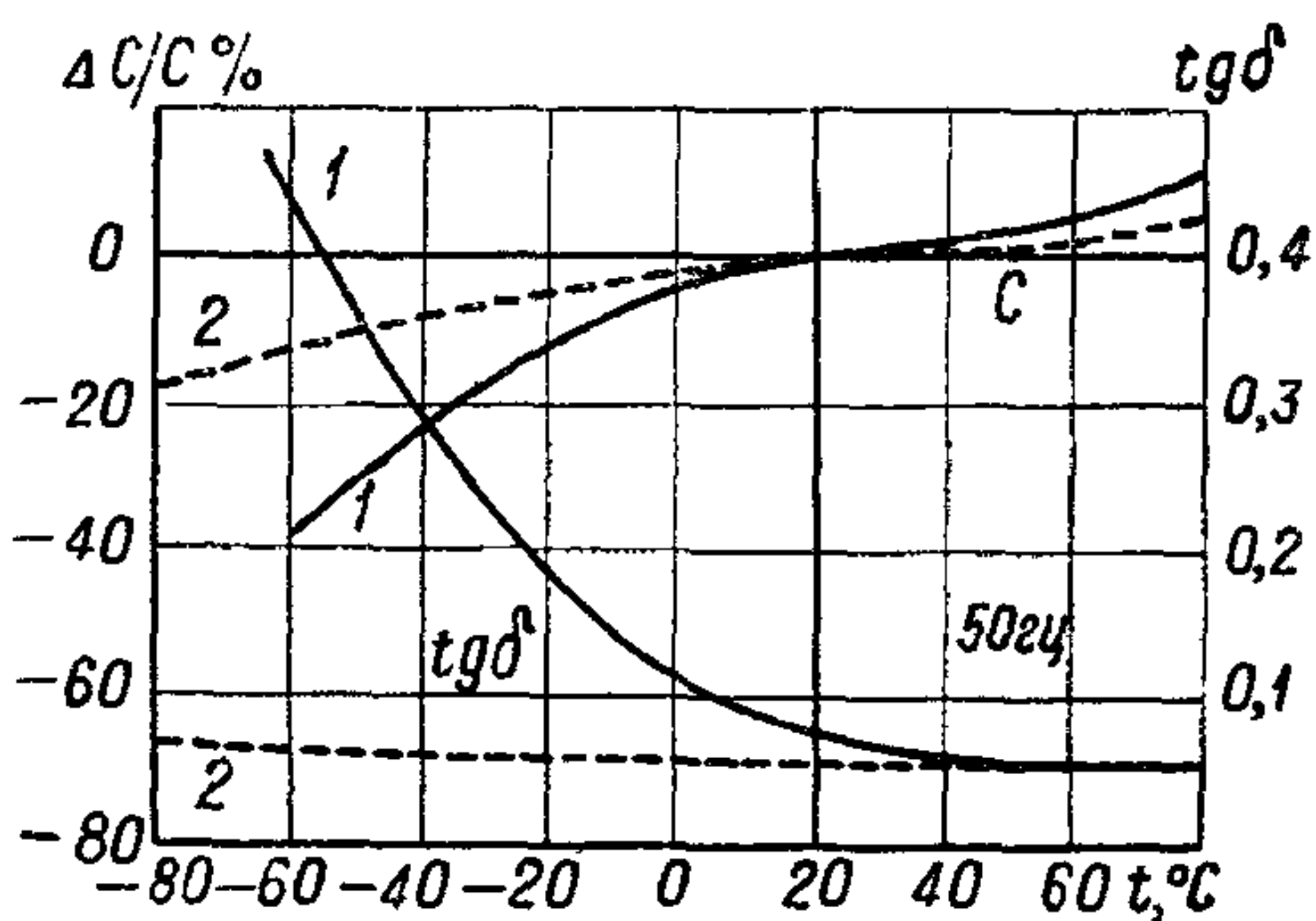


Рис. 293. Зависимость емкости и угла потерь от температуры для танталовых конденсаторов: жидкостного (типа ЭТО) 30 в и 25 мкф (1) и оксидно-полупроводникового (типа ОП) 20 в и 6,8 мкф (2).

¹ В СССР также начат выпуск конденсаторов К53-1А с верхним пределом рабочей температуры $+125^{\circ}\text{C}$.

удельными характеристиками и возможностью изготовления с малыми значениями $U_{\text{ном}}$. Поэтому производство этих конденсаторов быстро расширяется.

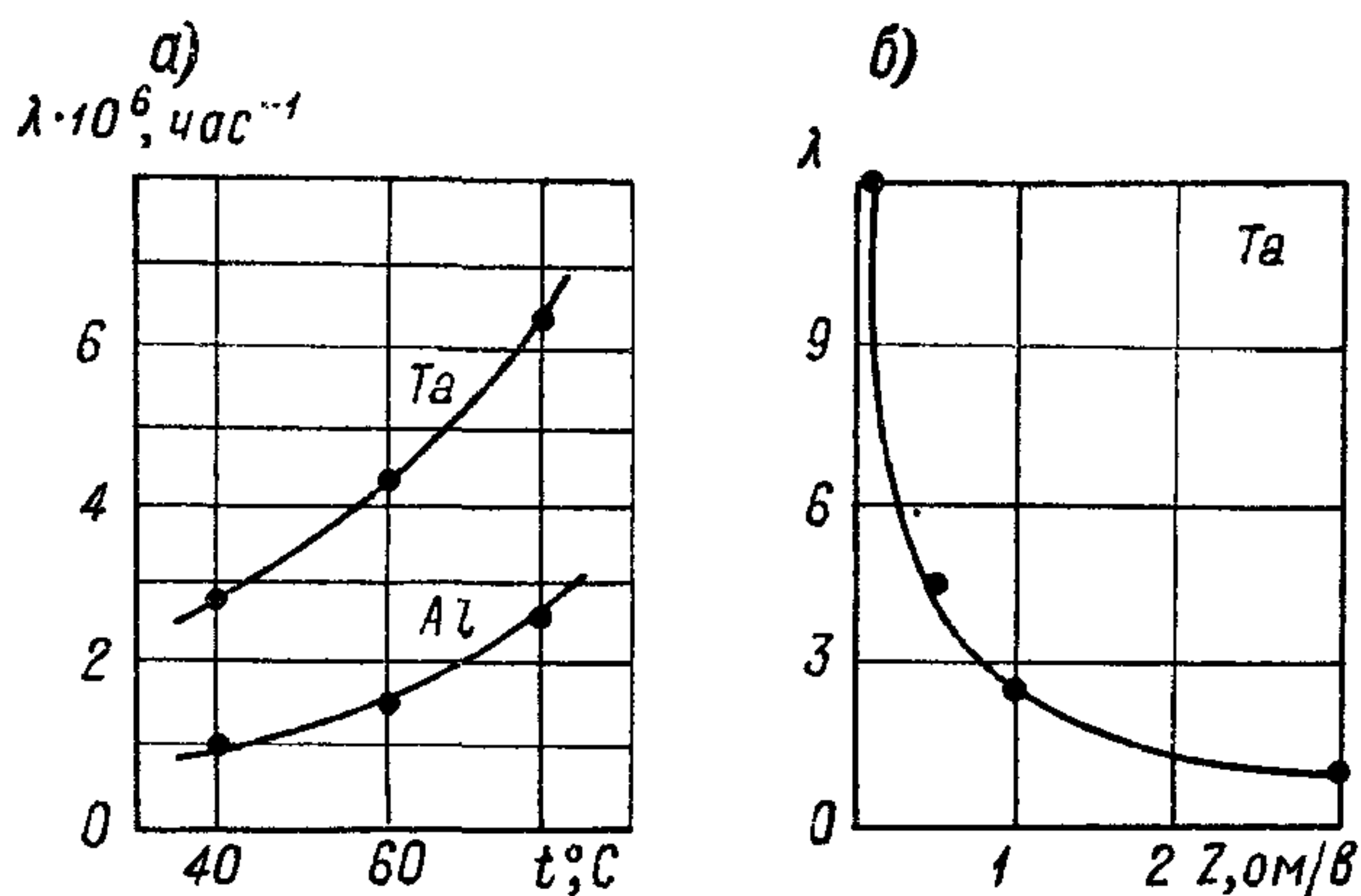


Рис. 294. Интенсивность отказов оксидно-полупроводниковых конденсаторов: а — сравнение температурной зависимости λ для танталовых и алюминиевых конденсаторов фирмы «Муллард»; б — зависимость λ танталовых конденсаторов от сопротивления цепи, в которую они включены.

Танталовые оксидно-металлические конденсаторы были получены еще в 1959 г. («печатные» конденсаторы)¹. Схема устройства блока таких конденсаторов, использованного для исследования их свойств, показана на рис. 295. На стеклянную подложку нанесен слой тантала методом катодного распыления² (в аргоне под давлением $2 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. при 5 кВ в течение 1 ч; катод $\phi 100$ мм из тантала на расстоянии 50 мм от подложки). Оксидный слой на тантале получался формовкой в щавелевой кислоте (1 часть кислоты, 2 части воды, 3 части этиленгликоля, по весу); при 105°C в течение 4—5 ч плотность тока 1 ма/см^2 . Поверх слоя Ta_2O_5 наносился металлический электрод испарением в вакууме (золото или алюминий дают близкие результаты). При диаметре электрода 6,25 мм емкость

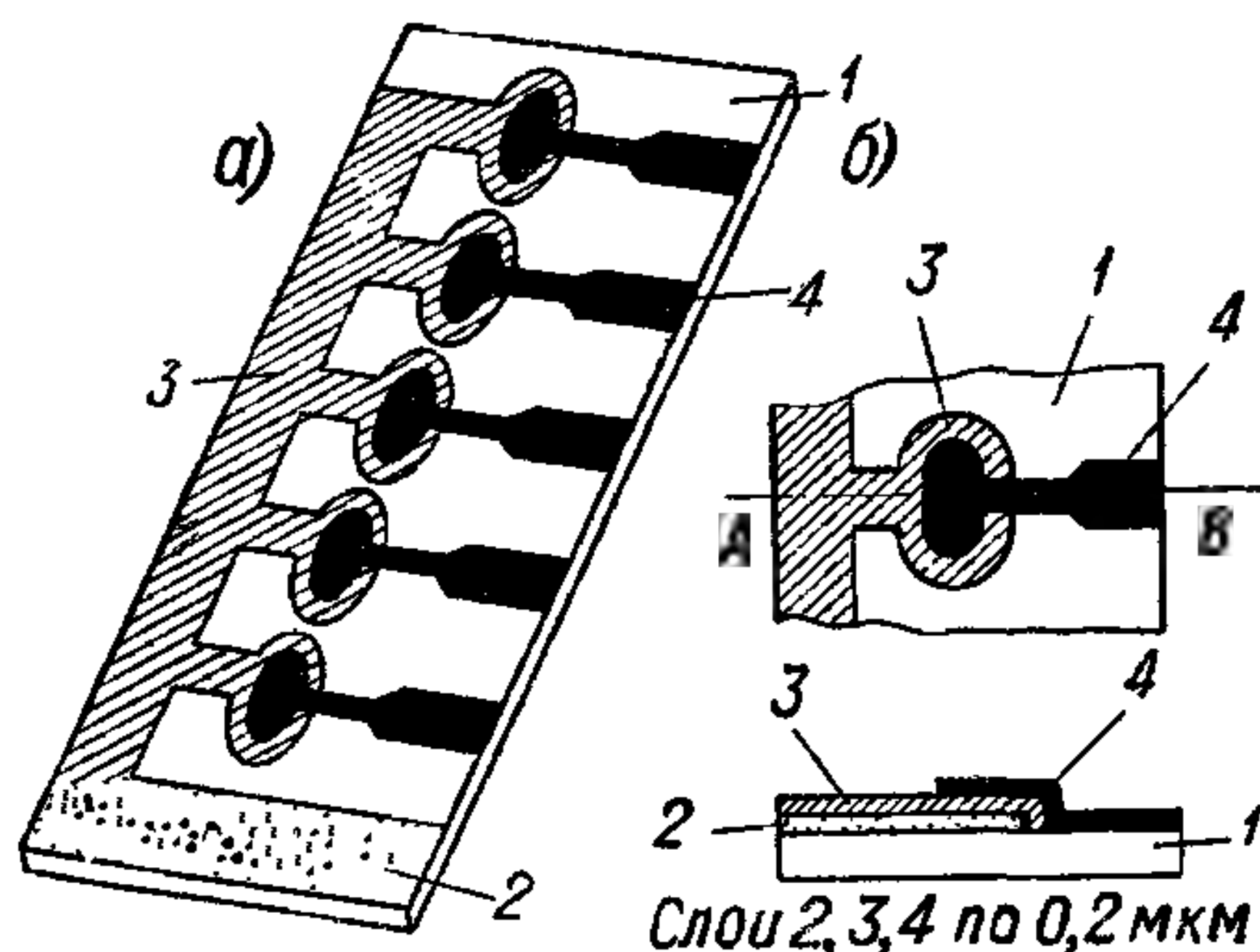


Рис. 295. Танталовый оксидно-металлический конденсатор: а — схема устройства блока конденсаторов; б — схема отдельного элемента.

1 — подложка; 2 — слой тантала; 3 — слой оксида тантала; 4 — второй металлический электрод.

на тантале получался формовкой в щавелевой кислоте (1 часть кислоты, 2 части воды, 3 части этиленгликоля, по весу); при 105°C в течение 4—5 ч плотность тока 1 ма/см^2 . Поверх слоя Ta_2O_5 наносился металлический электрод испарением в вакууме (золото или алюминий дают близкие результаты). При диаметре электрода 6,25 мм емкость

¹ R. W. Berry, D. I Sloan. Proceed. IRE, 1959, 47, № 6, p. 1070—1075.

² См. § 74, выше.

образцов изменялась от 250 000 $n\phi$ при $U_{\phi} = 3$ в, до 15 000 $n\phi$ при $U_{\phi} = 200$ в. Температурно-частотные характеристики конденсаторов показаны на рис. 296. В пределах от -200 до $+170^{\circ}\text{C}$ $\text{TKE} = +250 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, выше 170°C TKE несколько возрастает. Емкость мало изменяется с частотой вплоть до 10 кГц . При частоте 1 кГц и -200°C $\text{tg } \delta = 60 \cdot 10^{-4}$, а при $+100^{\circ}\text{C}$ — $70 \cdot 10^{-4}$, заметное возрастание $\text{tg } \delta$ начинается после 150°C . Удельное сопротивление оксида составляет около $10^{16} - 10^{17} \text{ ом} \cdot \text{см}$. Рост $\text{tg } \delta$ с частотой начинается после 1 кГц , при 10 кГц $\text{tg } \delta \approx 300 \div 1000 \cdot 10^{-4}$ в зависимости от U_{ϕ} . Униполярность проводимости выражена слабо и кратковременная смена полярности для конденсаторов неопасна. При температуре 65°C допускаемое рабочее напряжение равно $0,5U_{\phi}$. Конденсаторы аналогичного типа, но с использованием танталовой фольги (вместо слоя тантала на стеклянной подложке) были изучены также и в СССР. Подобные конденсаторы представляют интерес для использования в малогабаритной аппаратуре при малых напряжениях и относительно небольших емкостях — до 0,1—0,25 мкФ .

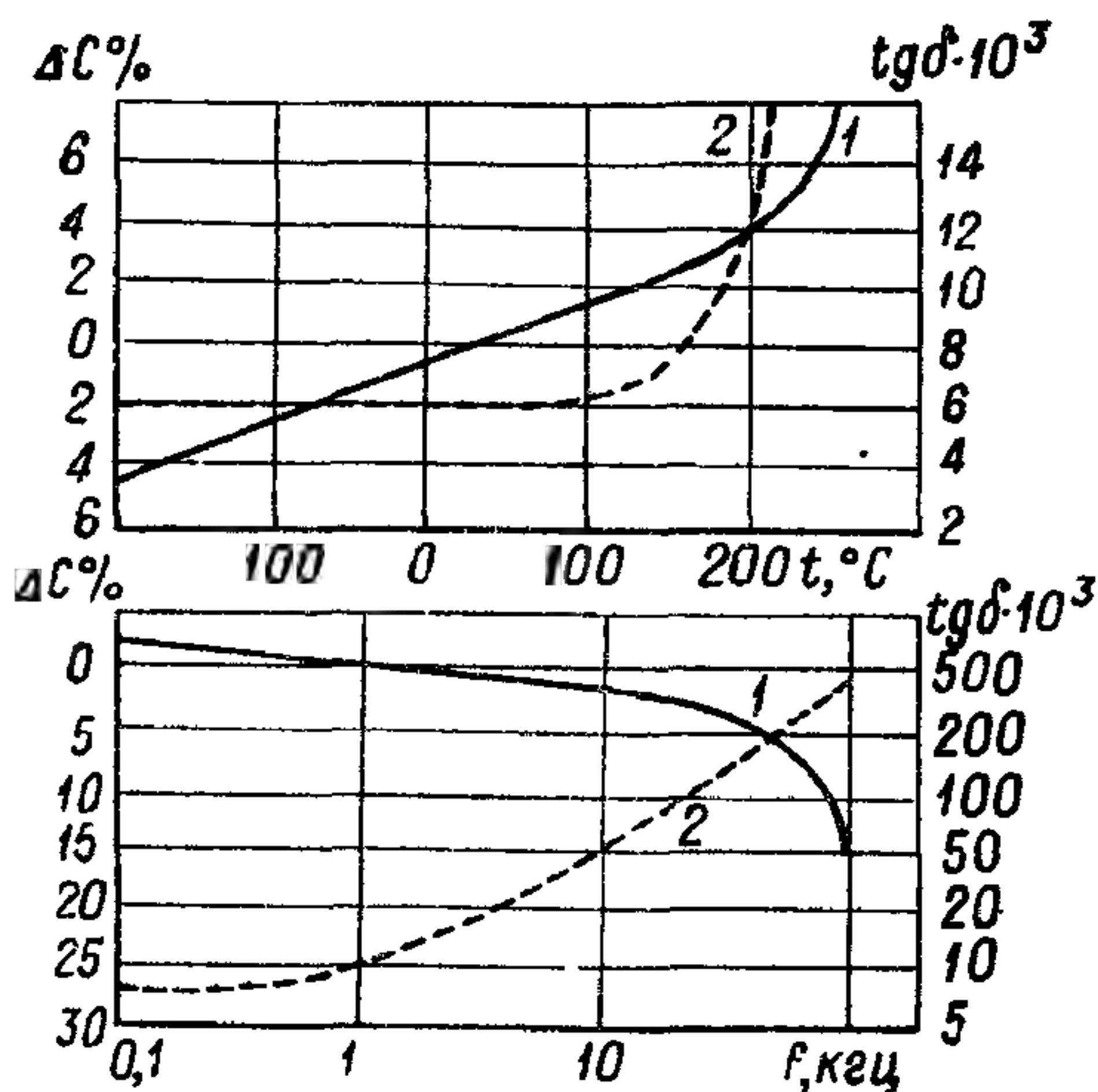


Рис. 296. Температурно-частотная зависимость емкости (1) и угла потерь (2) для танталового «печатного» конденсатора.

§ 90. Ниобиевые и титановые конденсаторы

Н и о б и й представляет собой вентильный металл, наиболее близкий к танталу (табл. 27), но менее дорогой и не столь дефицитный. Поэтому на этот металл было обращено внимание как на возможный заменитель тантала в конденсаторостроении (в США ниобий иногда называют к о л у м б и е м). Ниобий можно применить в виде добавки к танталу (у нас используют сплав 75% Ta и 25% Nb), но основное применение он находит теперь в чистом виде, преимущественно для изготовления объемнопористых анодов для ОП-конденсаторов. Величина ϵ для Nb_2O_5 заметно повышена в сравнении с ϵ для Ta_2O_5 (соответственно 45 и 27), но относительная толщина оксидного слоя также выше, чем у тантала, а поэтому выигрыш в емкости меньше, чем можно было ожидать, исходя из величины ϵ ; по данным ФРГ при переходе от Ta к Nb можно снизить объем конденсатора не более чем на 30%.

Температура плавления ниобия ниже, чем у тантала, а потому приходится снижать температуру спекания прессованных анодов до 1900°C и даже ниже; это ухудшает удаление примесей из анода в процессе спекания и дает увеличение тока утечки по сравнению с танталовыми конденсаторами, это же обстоятельство снижает верхний предел рабочей температуры.

Преимуществом ниобия является его сниженный удельный вес, дополнительно удешевляющий конденсаторы и улучшающий их весовые характеристики. Кривые статической формовки ниобиевых анодов при постоянной плотности тока показаны на рис. 297 по данным Варнера (ФРГ). В обычном электролите — водном растворе фосфатов при 25°C можно поднять U_{ϕ} до 250 в (кривая 1), но при 95°C U_{ϕ} ниже 100 в (кривая 2). Применяя специальный

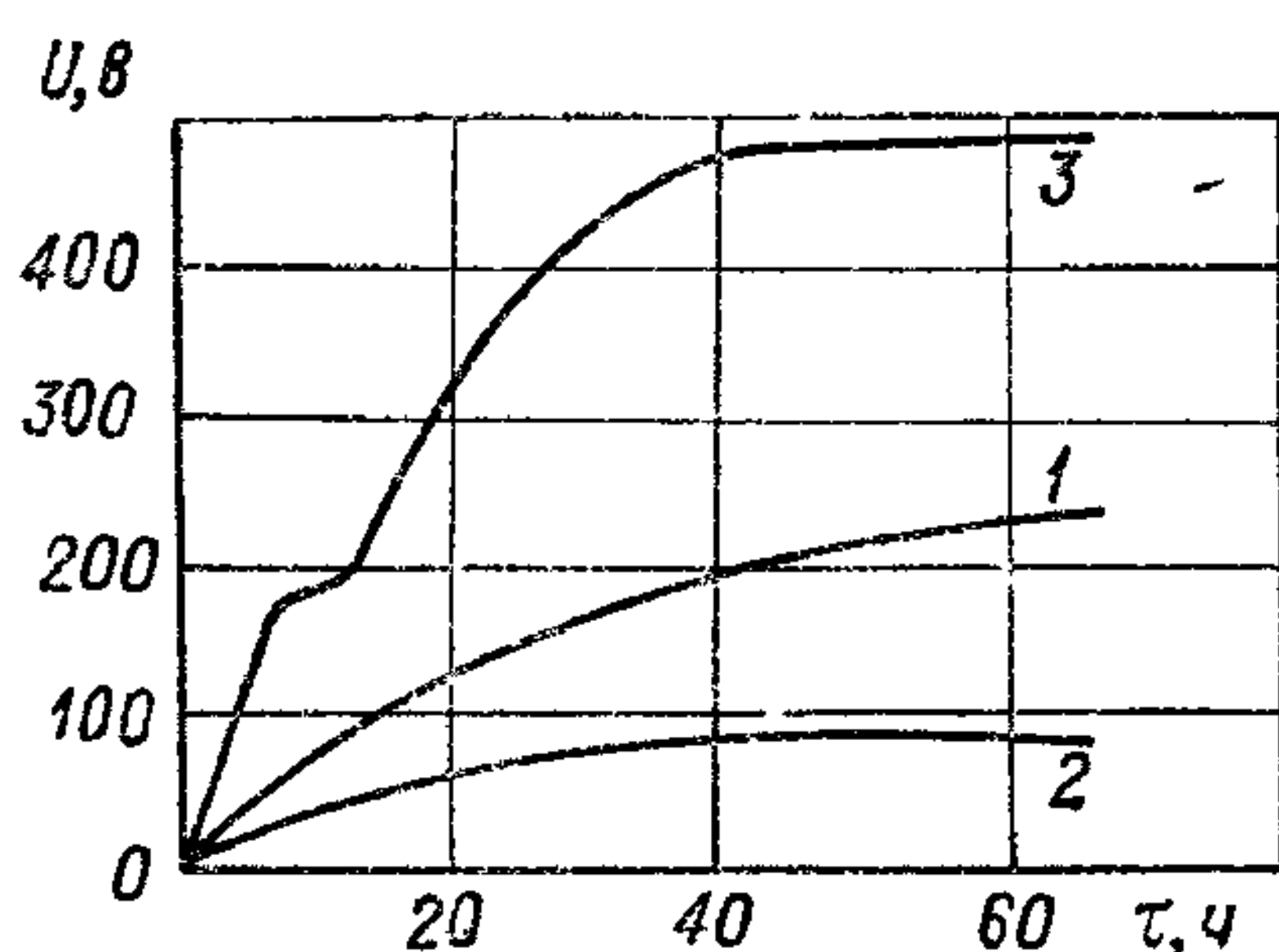


Рис. 297. Кривые формовки ниобиевых анодов (обозначения кривых указаны в тексте).

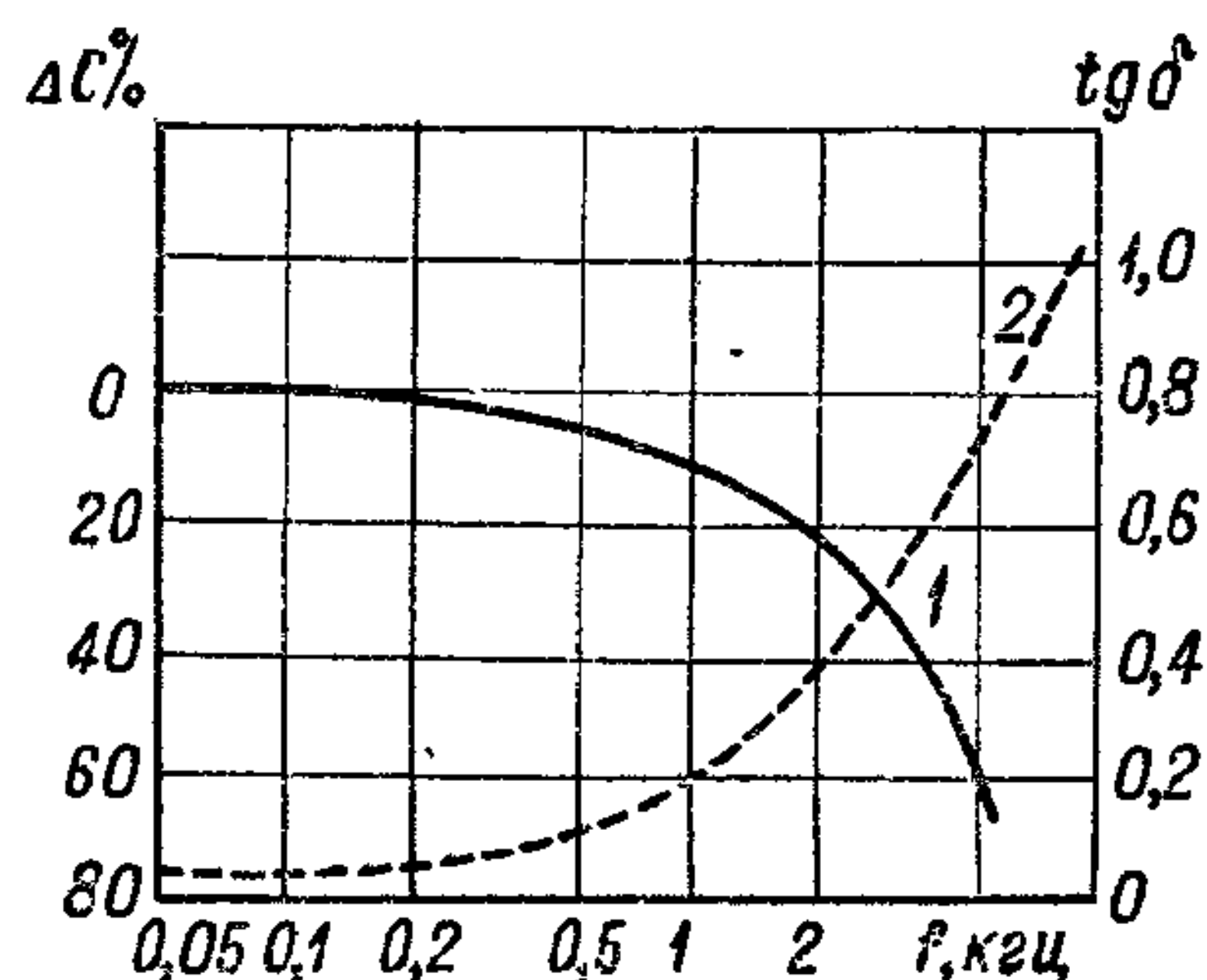


Рис. 298. Зависимость емкости (1) и угла потерь (2) от частоты для ниобиевого оксидно-полупроводникового конденсатора.

органический электролит, можно поднять U_{ϕ} выше 400 в (кривая 3). Формовочное напряжение рекомендуется брать равным 50% искрового напряжения U_0 , для конденсаторов оксидно-полупроводникового типа $U_{\text{ном}} = (1/3 \div 1/2) U_{\phi}$. Подобные конденсаторы при $U_{\phi} = 15 \div 30$ в и $C = 60 \div 90$ мкф имели $\text{tg } \delta = 0,038 \div 0,047$; постоянную времени — порядка $10^2 - 10^3$ сек. В пределах температуры от -40 до $+80^{\circ}\text{C}$ величина ТКЕ составляла около $+(800 \div 1200) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Частотная зависимость емкости и $\text{tg } \delta$ показана на рис. 298. Конденсаторы были разработаны для пределов $U_{\text{ном}}$ от 3 до 15 в с интервалом рабочих температур от -50 до $+85^{\circ}\text{C}$. При старении конденсаторов в течение 3000 ч при $U_{\text{ном}}$ и температуре 85°C в начале испытания наблюдалось некоторое снижение емкости (до 5—15%); далее характеристики оставались достаточно стабильными.

Отечественные ниобиевые оксидно-полупроводниковые конденсаторы (тип К53-4) изготавливаются с емкостью от 0,47 до 100 мкф при $U_{\text{ном}} = 6 \div 20$ в для диапазона температур $-60 \div +85^{\circ}\text{C}$. Типичные температурно-частотные характеристики показаны на рис. 299. Норма на $\text{tg } \delta$ при частоте 50 гц и 20°C составляет 0,15 —

— 0,20 (в зависимости от $C_{\text{ном}}$ и $U_{\text{ном}}$), удельный заряд доходит до 1000—1500 мкк/см³.

Жидкостные конденсаторы с объемнопористыми анодами из сплава тантала с ниобием (ТН-20) выпускаются под маркой К52-3 и по конструкции и характеристикам близки к конденсаторам типа ЭТО: $C_{\text{ном}} = 10 \div 1000$ мкф, $U_{\text{ном}} = 6 \div 90$ в.

Т и т а н по своим свойствам заметно отличается от других вентильных металлов и имеет другой тип окисла, одна из кристаллических модификаций которого обладает весьма высокой ϵ , около 100. Эта особенность привлекала к нему внимание многих исследователей, но попытки изготовить титановые электролитические конденсаторы долгое время оказывались безуспешными в связи с тем, что токи утечки имели большую величину и отличались нестабильностью во времени. Лишь недавно задача разработки титановых конденсаторов была разрешена в Японии. Эта страна не располагает запасами тантала и даже алюминия, тогда как титан в Японии имеется, поэтому японские исследователи уделили особо много внимания этому вентильному металлу. Для изготовления анодов были использованы титан с чистотой 99,5—99,7%, т. е. с бóльшим содержанием примесей, чем у тантала или алюминия. Титан использовался в виде проволоки и порошка с размером частиц 44—77 мкм¹. Позже была использована и титановая фольга. Проволочные аноды подвергались обработке в смеси HF + HNO₃ в течение 1 ч при комнатной температуре, промывались в течение 1 ч в воде и обрабатывались в 10% HNO₃ в течение 20 ч, после чего снова тщательно промывались.

Объемнопористые аноды прессовались из порошка с добавлением связки и спекались при температуре 850° С и остаточном давлении $3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Снижение температуры до 750° С приводило к возрастанию $\text{tg } \delta$ и тока утечки, повышение до 950° С давало резкое падение емкости из-за снижения пористости.

Для получения достаточно высоких электрических характеристик титановых конденсаторов японцы резко изменили способ

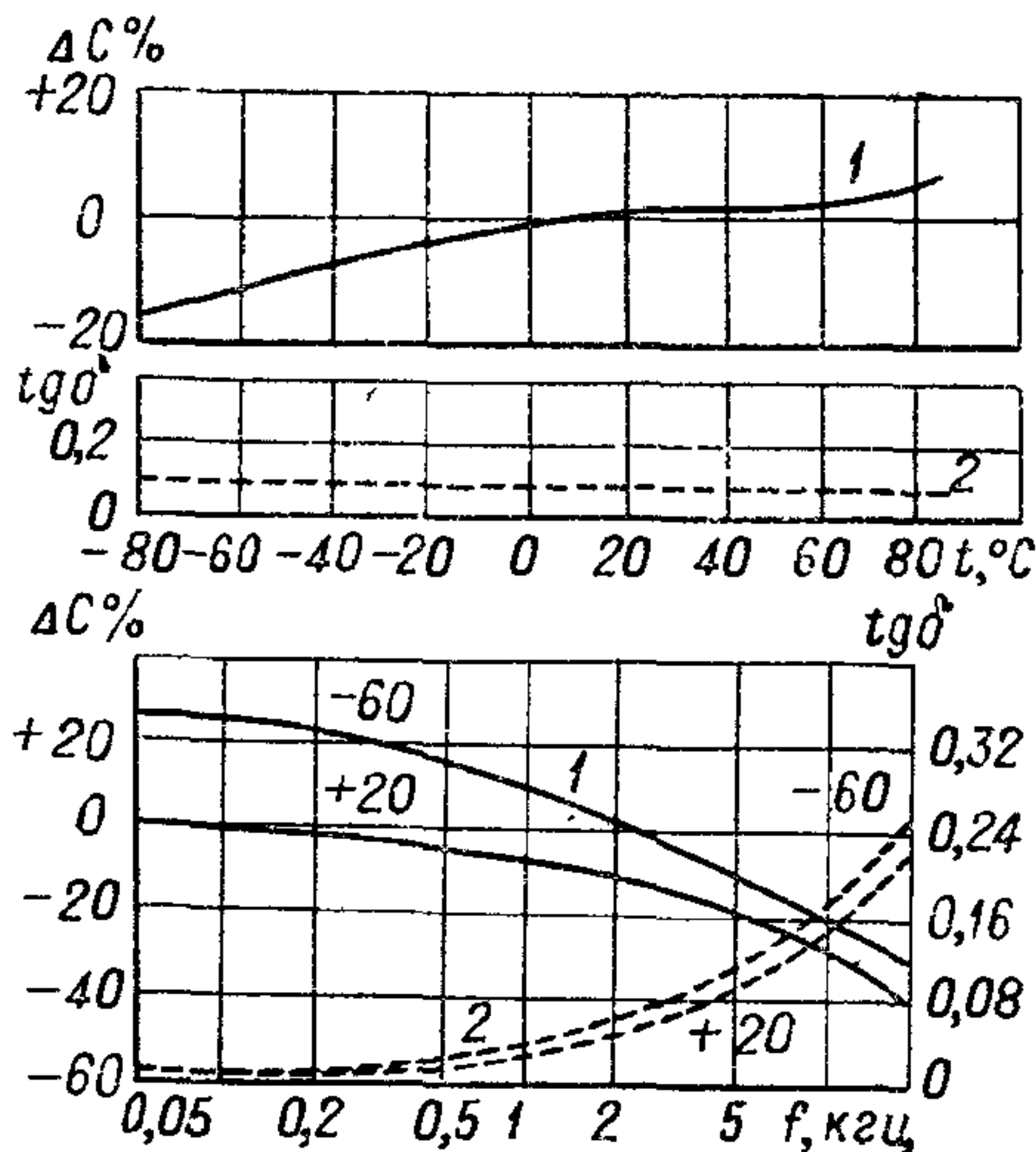


Рис. 299. Температурно-частотные характеристики отечественных ниобиевых ОП-конденсаторов типа К53-4:

1 — емкость; 2 — угол потерь; цифры у кривых в нижней части рисунка — значения температуры в °С.

¹ По другим данным 100—300 мкм.

формовки анодов: вместо обычной формовки в водных растворах была использована формовка в расплавленных солях при температуре 300°C . При формовке проволочных анодов применялся электролит, состоящий из 75% NaNO_3 и 25% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, для объемнопористых анодов применялся менее вязкий электролит из 50% NaNO_3 и 50% KNO_3 . При изготовлении жидкостных конденсаторов в качестве рабочего электролита применялась разбавленная азотная кислота HNO_3 . При изготовлении «твердых» конденсаторов в качестве полупроводника, как и в случае всех других вентильных металлов, применялась двуокись марганца MnO_2 . Как обычно, аноды пропитывались азотнокислым марганцем, затем следовал пиролиз при 300°C . Переформовка

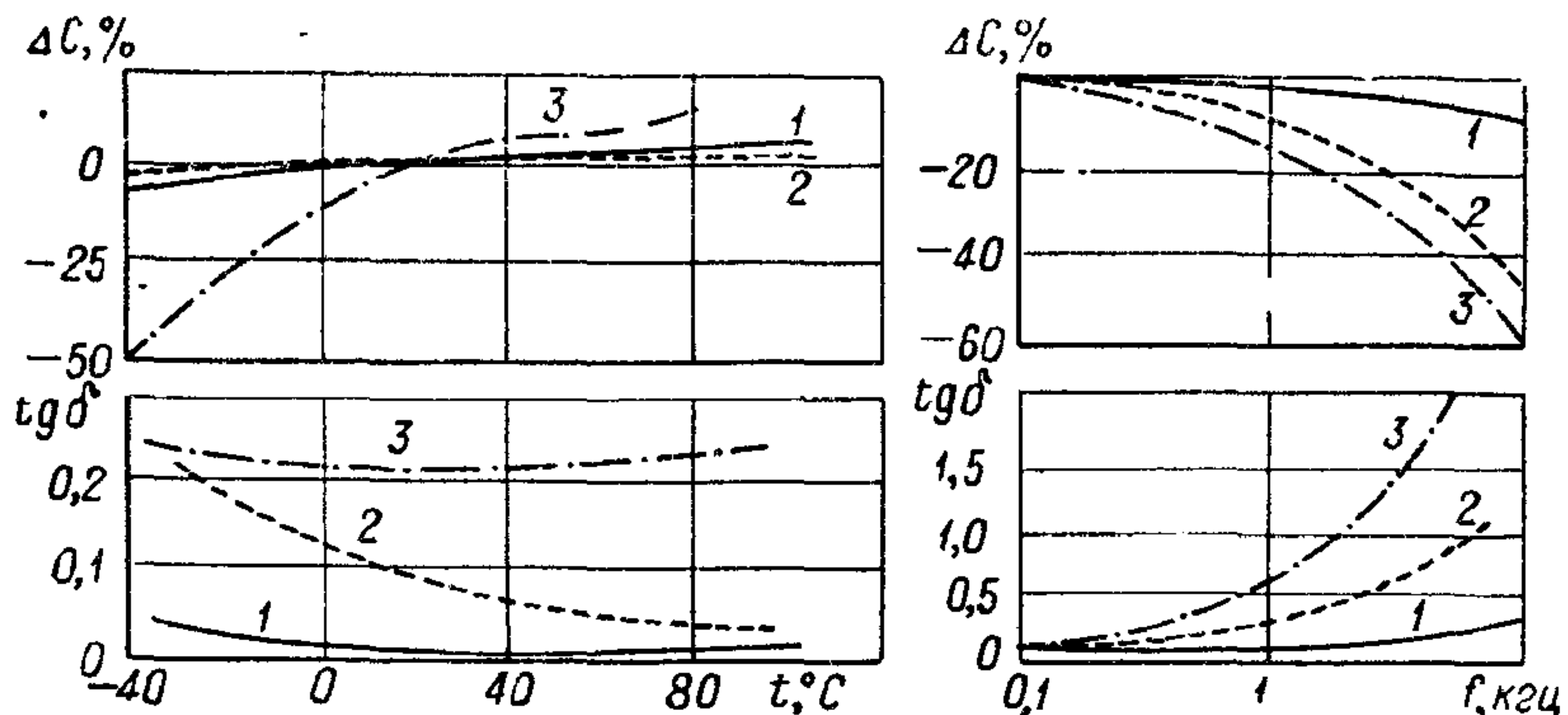


Рис. 300. Температурно-частотные характеристики японских титановых конденсаторов.

1 — проволочный ОП-конденсатор 10 в и 0,5 мкф; 2 — объемнопористый ОП-конденсатор 3 в, 10 мкф; 3 — объемнопористый жидкостный конденсатор 6 в и 100 мкф.

после пиролиза проводилась в уксуснокислом аммонии, причем процесс нанесения слоя полупроводника повторялся 3—4 раза.

Для жидкостных конденсаторов была получена емкость 200 мкф/г, $\text{tg } \delta \approx 0,04$ и ток утечки 0,1 мка/мкф · в при 20 в, что соответствует постоянной времени 10 сек. Температурно-частотные характеристики японских титановых конденсаторов показаны на рис. 300. Конденсаторы были разработаны на малые напряжения: 3—6 в. По-видимому, позже удалось поднять рабочее напряжение, так как в 1964 г. были опубликованы сравнительные характеристики фольговых (сухих) японских конденсаторов из алюминия, тантала и титана на рабочее напряжение 15 в при емкости 10 мкф (рис. 301). Согласно японским данным, по величине $\text{tg } \delta$ и тока утечки Ti занимает среднее положение между Ta и Al, а по снижению емкости на морозе дает результаты хуже, чем Al.

Судя по высокому значению ϵ оксида титана, реализованному в керамике, можно было ожидать большого выигрыша в $C_{\text{уд}}$ для титановых конденсаторов в сравнении с танталовыми, однако этому препятствует как повышенная относительная толщина

оксида, так и трудность обеспечить при электролитическом нанесении TiO_2 большое содержание кристаллической модификации с наибольшим значением ϵ . По-видимому, выигрыш в удельном заряде можно получить не свыше 30—50%. В отношении величины $U_{\text{ном}}$ можно отметить, что в 1964 г. японцы указывали следующие значения верхнего предела этой величины: Al — 600 в, Ta — 300 в, Nb — 120 в и Ti — 80 в. Все же титан представляет значительный интерес как вентильный металл, и дальнейшей разработки титановых конденсаторов можно ждать и в других странах, кроме Японии.

Так, в США еще в 1961 г. было проведено исследование

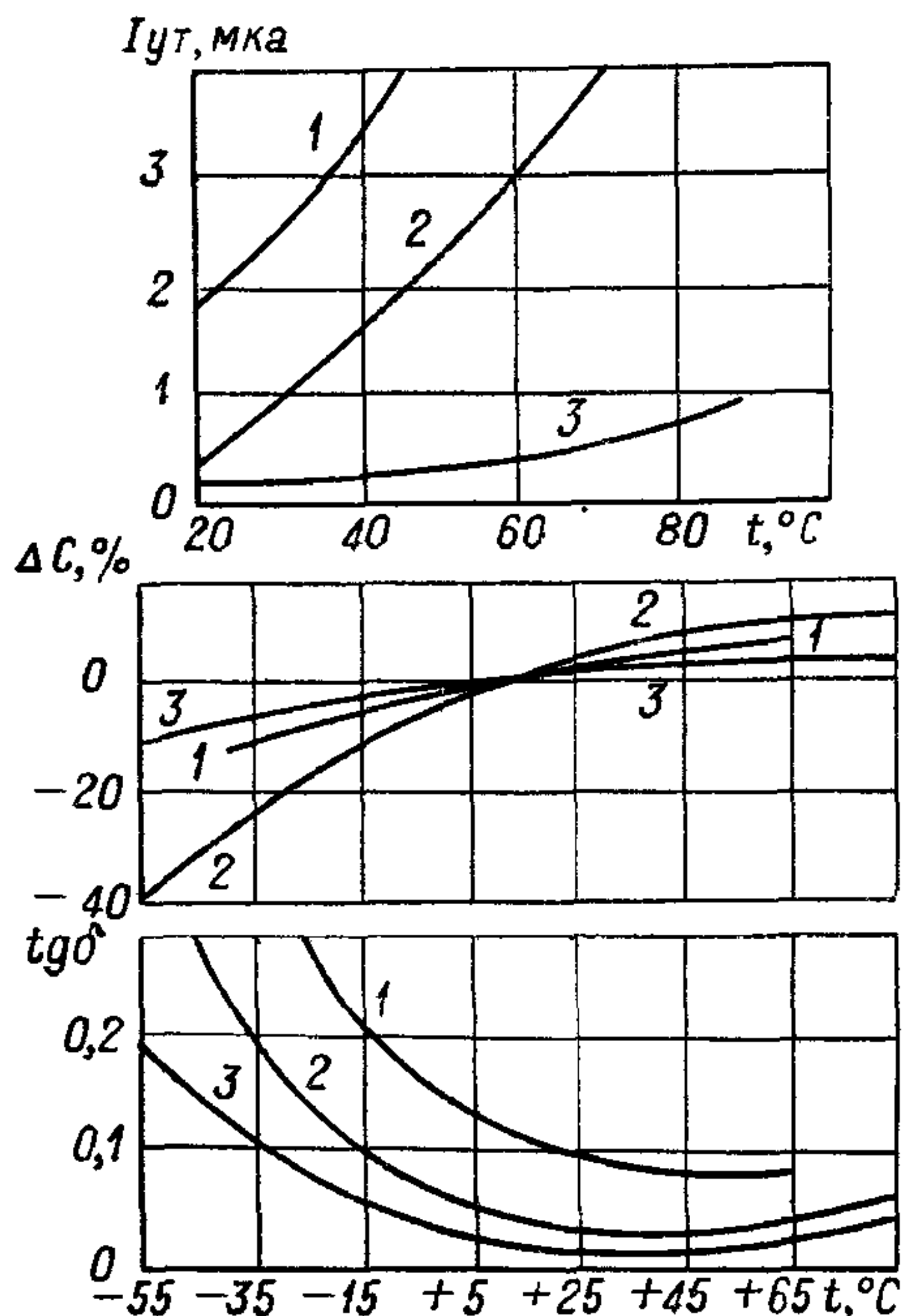


Рис. 301. Сравнение характеристик японских конденсаторов одного типа, но с разными вентильными металлами.

1 — алюминий; 2 — титан; 3 — тантал (сухой тип: 15 в, 10 мкф).

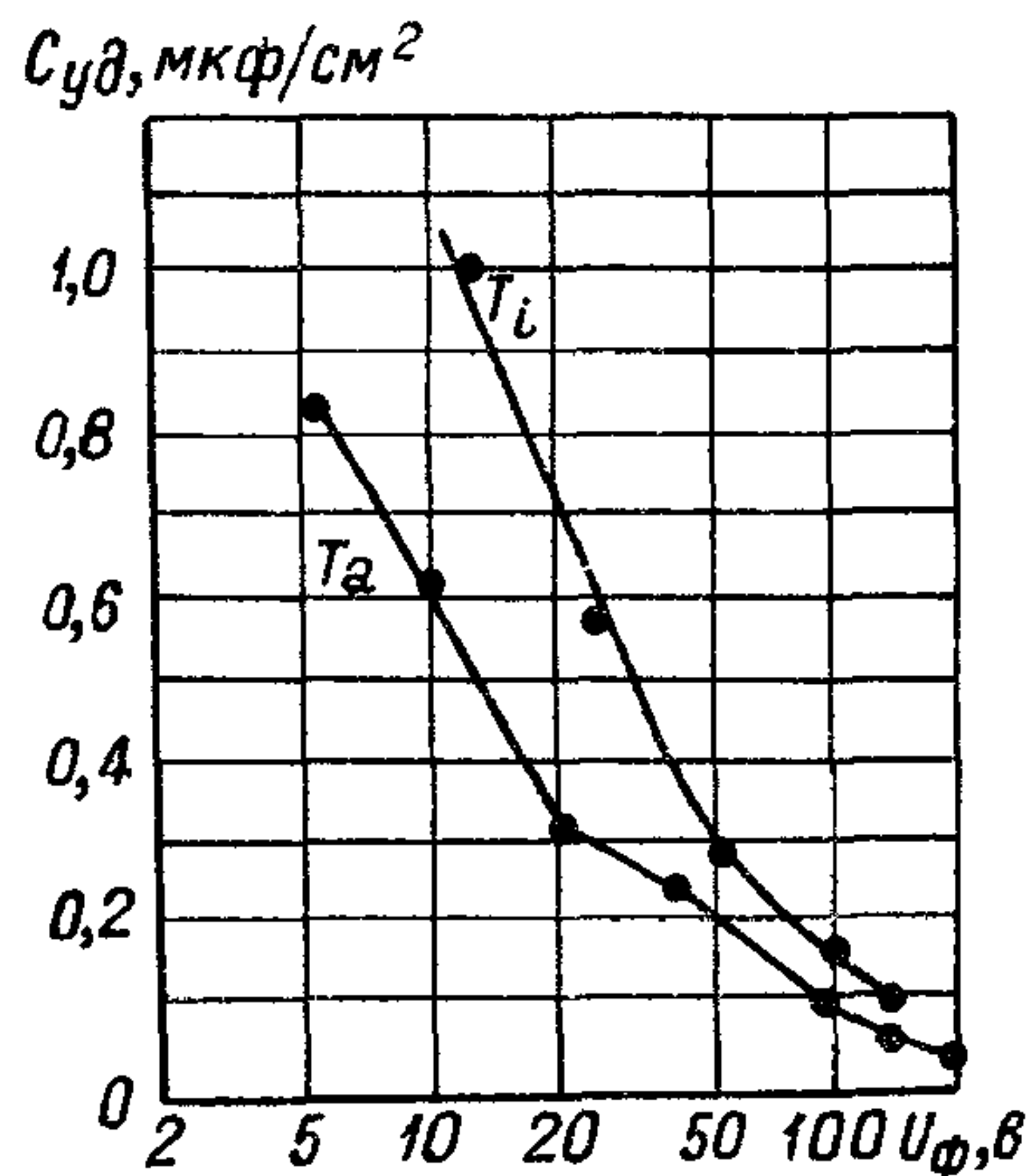


Рис. 302. Зависимость удельной емкости, рассчитанной на единицу площади, от формовочного напряжения для танталового и титанового «печатных» конденсаторов.

титановых оксидно-металлических («печатных») конденсаторов, подобных описанным выше, танталовым (см. рис. 295). Пленка титана наносилась методом испарения в вакууме при 10^{-5} мм рт. ст. на стеклянную подложку, которая предварительно очищалась химически и обработкой тихим разрядом. Формовка полученного на стекле слоя титана производилась при плотности тока 1 а/см^2 в смеси водного раствора щавелевой кислоты с этиловым спиртом. Вторым электродом служил алюминий, также нанесенный испарением в вакууме; площадь обкладки $0,05 \text{ см}^2$. Сравнение значений удельной емкости для титановых и танталовых «печатных» конденсаторов, которое дано на рис. 302, подтверждает, что выигрыш в величине $C_{\text{уд}}$ для титана хотя и

имеется, но не очень большой (при $U_{\phi} = 10$ в около 40%). Интересно отметить, что в США удалось получить U_{ϕ} для титана выше, чем указывали японцы, возможно, в связи с тем, что чистота слоя, полученного испарением, получилась выше, чем для исходного титана. Для оксидно-металлических титановых конденсаторов при 1 кГц $\operatorname{tg} \delta = 0,02 \div 0,05$ и $\operatorname{TKE} = \pm 300 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ для пределов температуры от -200 до $+150^{\circ} \text{C}$. При этом верхнем пределе $\operatorname{tg} \delta$ достигает значения 0,045. Интересно, что значения $\operatorname{tg} \delta$ и TKE резко отличаются от соответствующих значений для керамических конденсаторов из масс на основе TiO_2 , что указывает на значительное различие в структуре двуокиси титана в оксидном слое электролитического конденсатора и в диэлектрике керамического конденсатора.

§ 91. Схема, эквивалентная электролитическому конденсатору

На рис. 266 мы привели упрощенную эквивалентную схему для электролитического конденсатора, которая в первом приближении может объяснять его поведение при небольших частотах. При повышении частоты явления, происходящие в конденсаторе, усложняются и это требует использования более сложных эквивалентных схем. Может возникнуть вопрос, почему необходимо рассматривать высокочастотное поведение такого конденсатора, который отличается униполярной проводимостью и предназначен для работы при постоянном напряжении? Практически электролитические конденсаторы почти всегда используют при наложении на основное постоянное «поляризующее» напряжение той или иной переменной составляющей. Кроме того, в принципе они могут работать и при малых напряжениях чисто переменного тока, много меньших номинального постоянного напряжения, если напряжение так мало, что не приводит к нагреву конденсатора из-за его высокого угла потерь, а высокое значение $\operatorname{tg} \delta$ все же допустимо, несмотря на его отрицательное влияние на добротность схемы.

Развернутая эквивалентная схема электролитического конденсатора, рассчитанная на ее применение в широком диапазоне частот, была предложена Вахенхузен¹ (рис. 303, а). Участки 1 и 6 учитывают активное сопротивление и индуктивность выводов анода и катода (и самих анода и катода), участок 2 — емкость оксидного слоя, его диэлектрические потери и утечку, участки 3 и 5 учитывают поляризационные слои у анода и у катода, участок 4 — активное сопротивление электролита, C_{AK} изображает емкость между анодом и катодом. Иногда, пренебрегая поляризационными явлениями, эквивалентной схеме электролитиче-

¹ С. Wachenhusen — «Hochfrequenztechnik und Elektroakustik», 1941, Bd. 57, № 5.

ского конденсатора придают вид, показанный на рис. 303, б, где сохранены обозначения рис. 303, а. Пренебрегая величинами L_a , L_k , r_a и r_k , что допустимо в области частот до 10^3 — 10^4 гц,

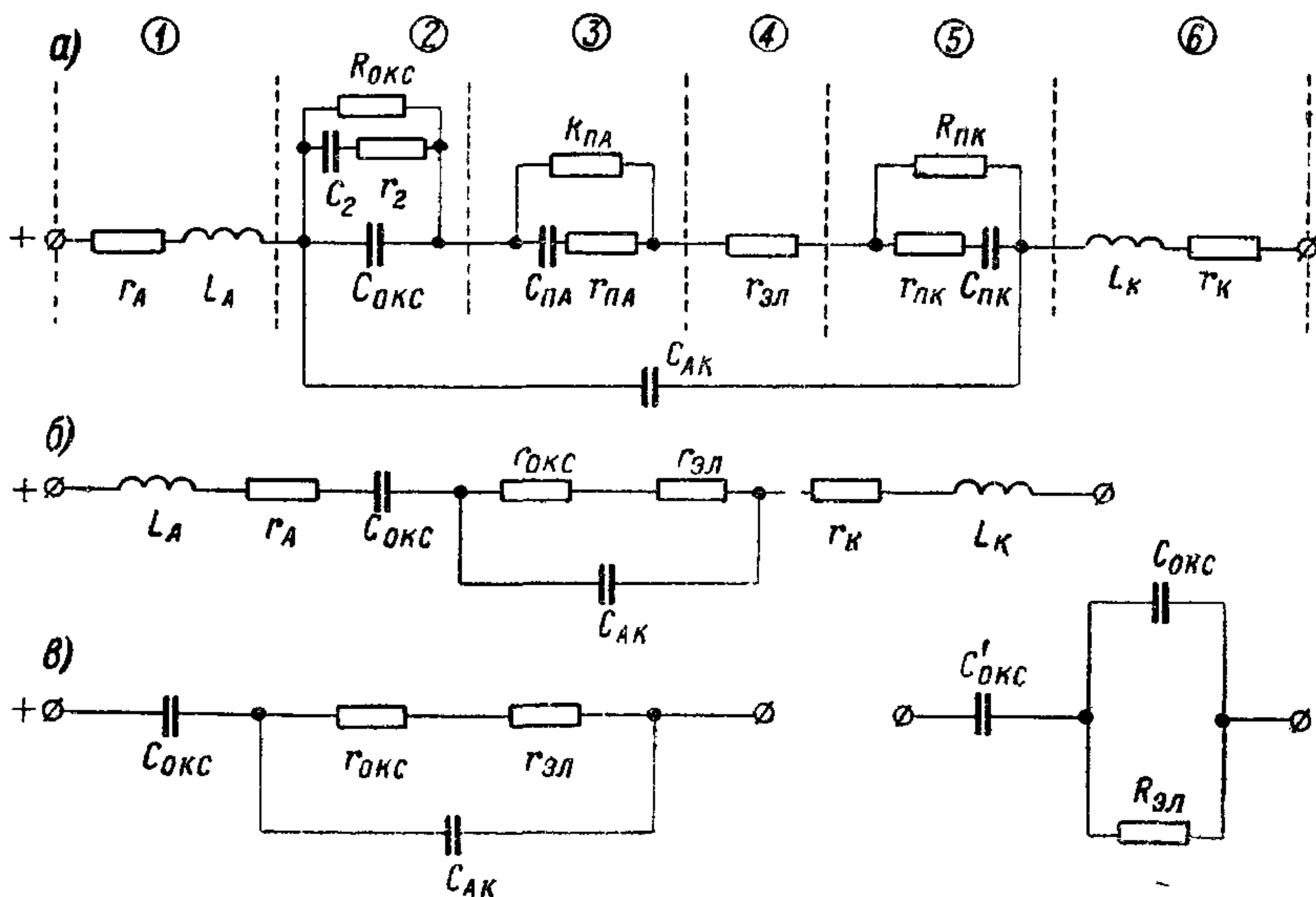


Рис. 303. Схемы, эквивалентные электролитическому конденсатору: а — полная схема по Вахенхузену; б — упрощенная схема; в — упрощенная схема для диапазона частот до 10^3 — 10^4 гц по Закгейму; г — усложнение схемы оксидного слоя для учета его пористости.

Л. Н. Закгейм пришел к схеме рис. 303, в, для которой им получены следующие формулы:

эквивалентная последовательная емкость (соответствующая простейшей эквивалентной схеме рис. 266)

$$C_r = \frac{C_{окс} + R^2 \omega^2 C_{окс} C_{ак}^2}{1 + R^2 \omega^2 C_{ак} (C_{окс} + C_{ак})}; \quad (296)$$

тангенс угла потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R \omega C_{окс}}{1 + R^2 \omega^2 C_{ак} (C_{окс} + C_{ак})}; \quad (297)$$

эффективная емкость

$$C_o = \frac{C_{окс} (1 + R^2 \omega^2 C_{ак}^2)}{\sqrt{1 + R^2 \omega^2 (C_{окс}^2 + 2 C_{ак} C_{окс} + 2 C_{ак}^2) + R^4 \omega^4 C_{ак}^2 (C_{окс} + C_{ак})^2}}, \quad (298)$$

где $R = r + r_{эл}$.

Надо отметить, что под C_o понимается не емкость, рассчитанная по формуле (283) и соответствующая параллельной эквивалентной емкости, а емкость идеального конденсатора без потерь, потребляющего тот же ток, что и электролитический конденсатор.

Для конденсатора без потерь $I = U\omega C_0$, откуда $C_0 = I/U\omega$. Для электролитического конденсатора ток равен $I = U/z$, где при отсутствии индуктивности в последовательной схеме замещения

$$z = \frac{U}{I} = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C_r}\right)^2}.$$

Здесь значения r и C_r найдены измерением на мосте. Используя указанные здесь выражения, находим:

$$C_0 = \frac{1}{\omega \sqrt{r^2 + \frac{1}{\omega^2 C_r^2}}} = \frac{C_r}{\sqrt{1 + \omega^2 C_r^2 r^2}} = \frac{C_r}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}. \quad (299)$$

Как видим, в данном случае в отличие от формулы (283) выражение в знаменателе входит под знаком корня.

Формулы (297) и (298) дают качественное согласие с опытом (рис. 304), показывая, что емкость падает с ростом частоты,

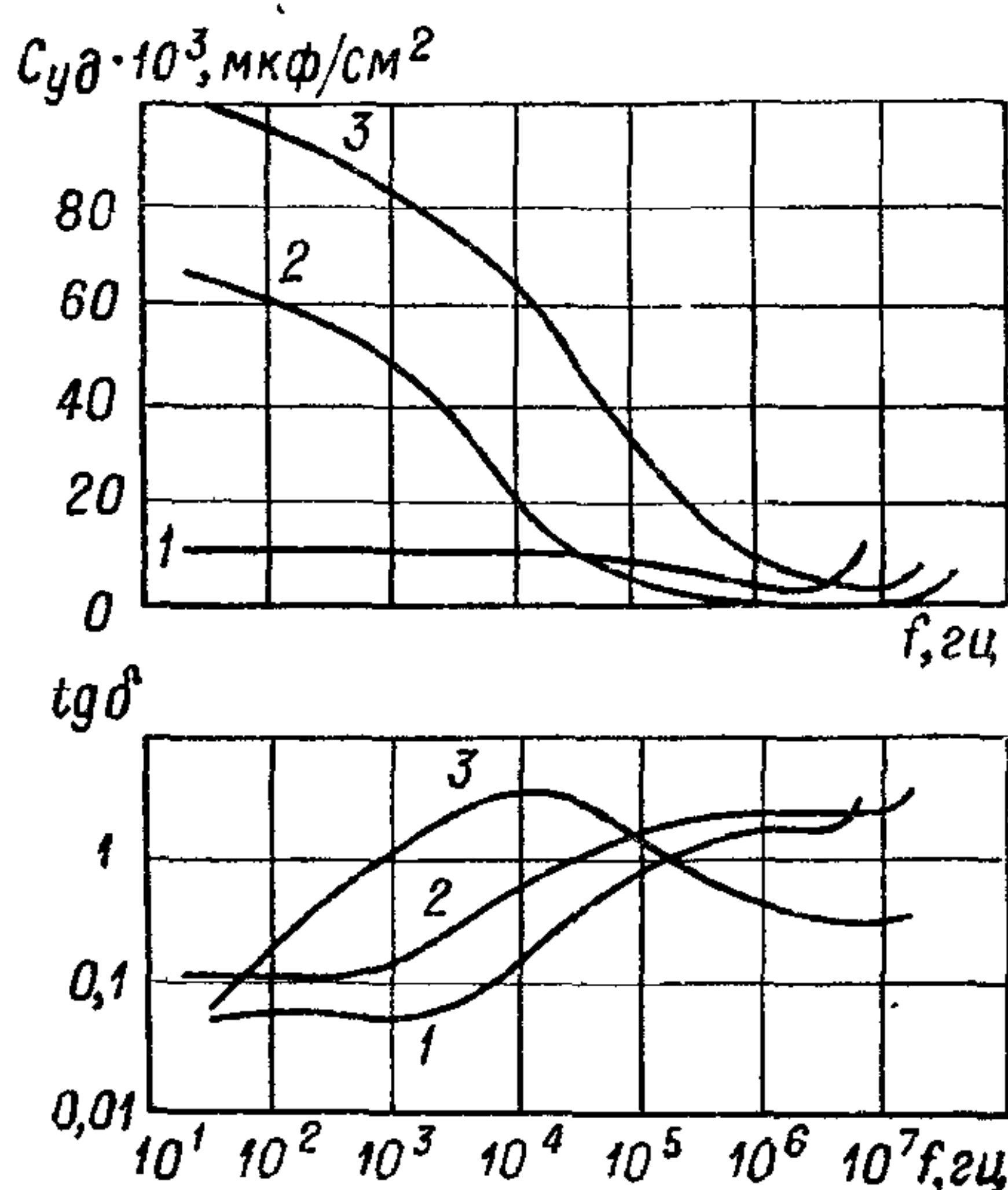


Рис. 304. Зависимость емкости и угла потерь сухих электролитических алюминиевых конденсаторов от частоты в широком диапазоне частот.

1 — конденсатор на 500 в с гладким анодом; 2 — конденсатор на 50 в с гладким анодом; 3 — конденсатор на 500 в с травленным анодом.

а $\operatorname{tg} \delta$ проходит через максимум. Возрастание емкости с частотой в области частот выше 1 Мгц следует объяснять влиянием индуктивностей L_A и L_K , которые в формуле (298) не учтены.

Полного количественного совпадения расчетных данных с опытом формулы (297) и (298) не дают. Это можно объяснить тем, что в схеме рис. 303, в оксидный слой рассматривается как вполне однородный. На самом деле, как показывает рис. 277, обычно только часть слоя, прилегающая к поверхности алюминия, сплошная, а наружная часть пронизана порами, в которые заходит электролит. Поэтому фактическое значение R , входящее в приведенные выше формулы, будет больше расчетного за счет неучтенного сопротивления электролита в порах оксидного слоя и сни-

жение емкости при повышении частоты будет несколько больше, чем можно получить по формуле (298). В связи с этим было предложено заменять емкость оксидного слоя $C_{окс}$ в схеме рис. 303, в эквивалентной схемой рис. 303, г, где $C'_{окс}$ — емкость сплошной части оксидного слоя, $C''_{окс}$ — емкость пористой части и $R'_{эл}$ — сопротивление электролита в порах внешней части оксидного слоя. По-видимому, попытку учесть пористость оксидного слоя

сделал и Вахенхузен, введя емкость C_2 и сопротивление r_2 параллельно $C_{\text{окс}}$ на участке 2 схемы рис. 303, а.

В случае танталовых конденсаторов с объемнопористыми анодами приходится учитывать, что емкость анода образуется из емкостей отдельных составляющих его зерен, разделенных прослойками электролита. Для упрощения можно рассматривать не

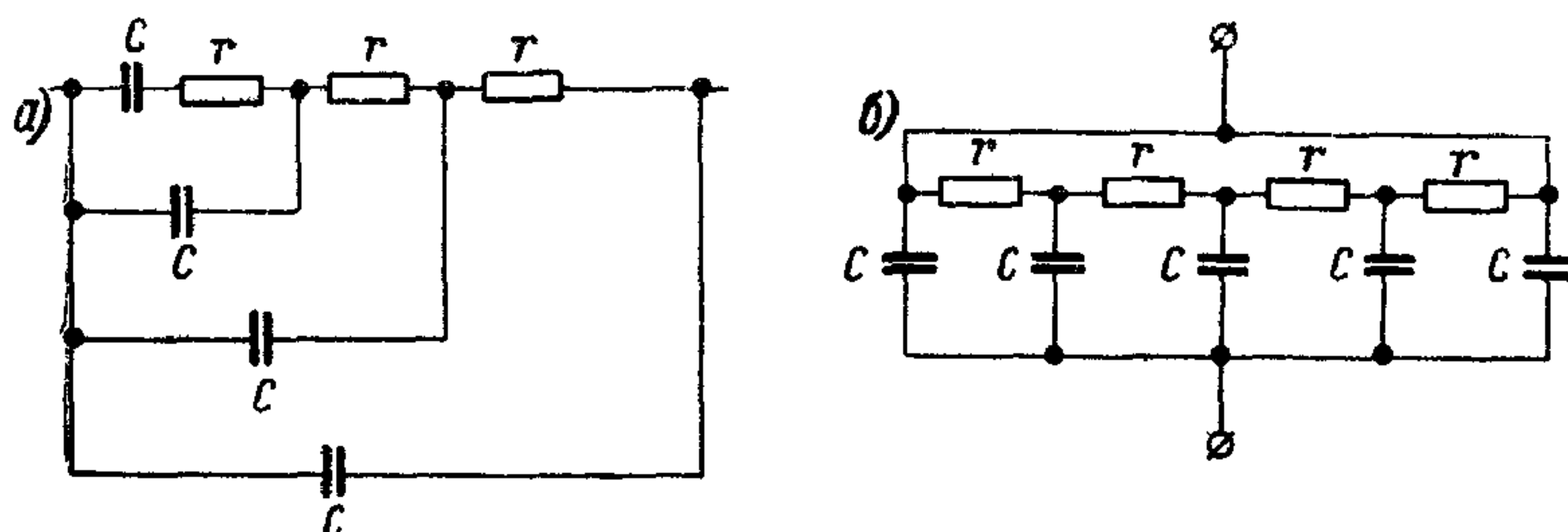


Рис. 305. Эквивалентная схема объемнопористого анода: а — по Нгуэн Тьен-Чи и Верньолю; б — по Закгейму.

отдельные зерна, а отдельные слои зерен, лежащие на различных уровнях от поверхности анода. Анализ этого вопроса был проведен Нгуэном Тьен-Чи и Верньолем¹ и Л. Н. Закгеймом². Предложенные ими эквивалентные схемы для объемнопористого анода приведены на рис. 305. В более поздней работе Верньоля³ указывается, что при переменном напряжении следует рассматривать распространение волны гармонического характера в глубь

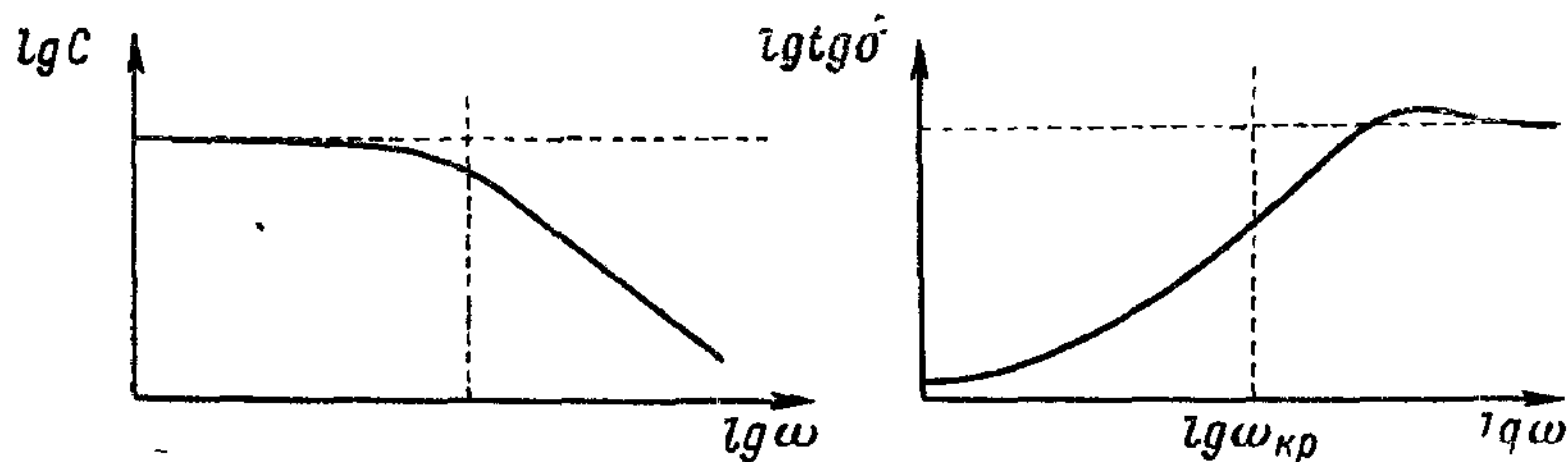


Рис. 306. Общий характер зависимости емкости и угла потерь от частоты для конденсатора с объемнопористым анодом.

анода, как волну в электрической линии, учитывая ее постепенное ослабление с изменением фазы. При повышенных частотах до глубинных частей анода доходит лишь ослабленная волна напряжения, сильно измененная по фазе. При этом получается характер зависимости емкости и угла потерь от частоты, показанный на рис. 306. Значение критической частоты $\omega_{\text{кр}}$ зависит от геометрии анода.

Поведение конденсатора при высоких частотах обычно характеризуют зависимостью его полного сопротивления от частоты,

¹ N. Thien-Chi, J. Vergnolle. «L'Onde Electrique», 1955, 35, № 336—337.

² Л. Н. Закгейм. — ЖТФ, 1957, № 9.

³ J. Vergnolle. «La Technique Moderne», 1965, 57, № 2.

которое носит *U*-образный характер, так как при частотах ниже резонансной величины z определяется емкостью и падает с ростом частот, а при частотах выше резонансной определяется индуктивностью, а потому растет с увеличением частоты (см. рис. 19, § 17). При резонансной частоте величина z определяется активным сопротивлением конденсатора, которое велико в случае сухих алюминиевых конденсаторов обычного типа в связи с высоким ρ электролита (рис. 307, *а*). В танталовых конденсаторах применены электролиты с резко сниженным сопротивлением, а потому при

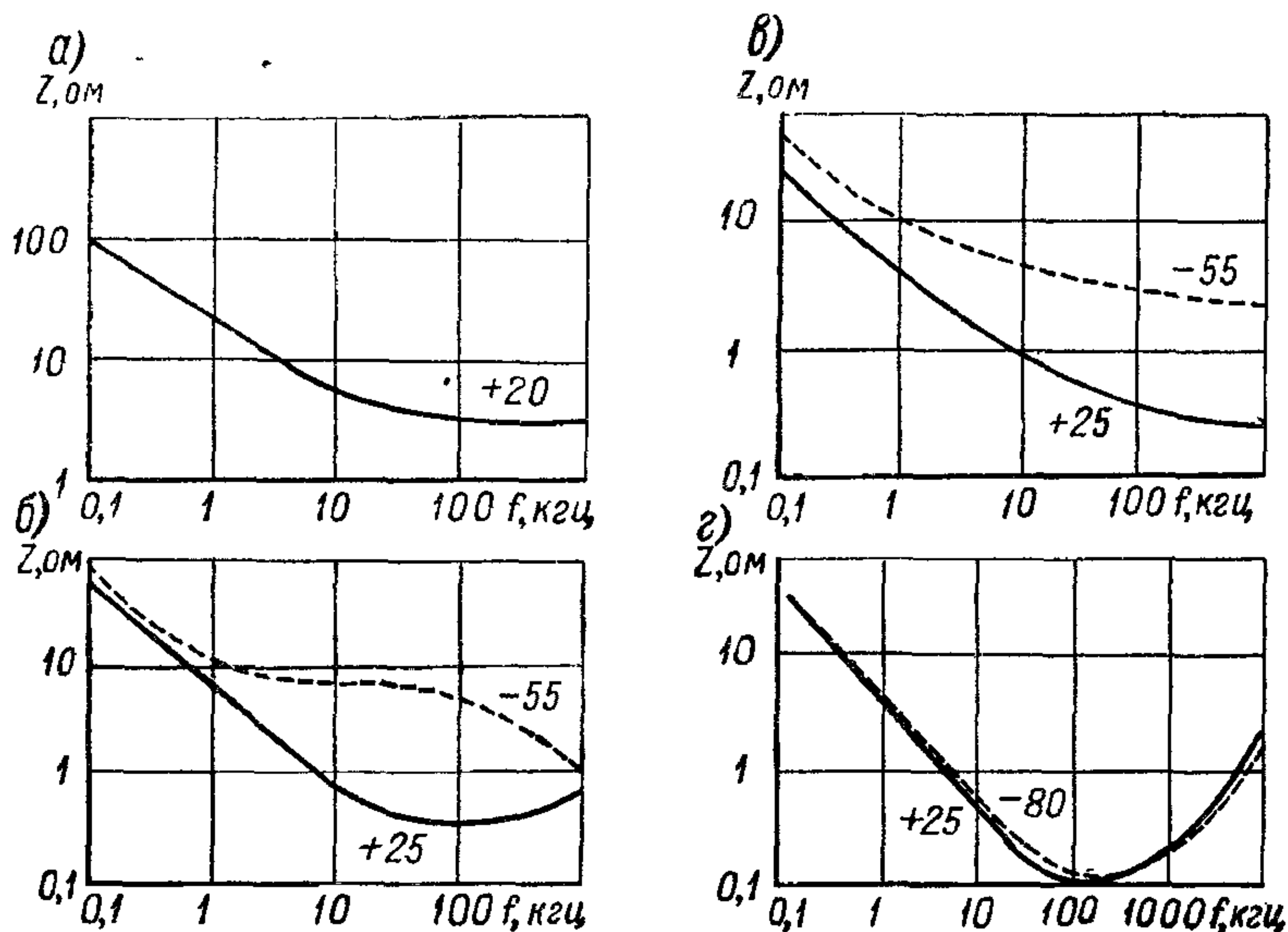


Рис. 307. Зависимость полного сопротивления электролитических конденсаторов от частоты: *а* — сухой алюминиевый конденсатор в корпусе $\varnothing 8 \times 22$ мм; *б* — сухой танталовый конденсатор 100 в, 36 мкф; *в* — жидкостный танталовый конденсатор 60 в, 68 мкф; *г* — оксидно-полупроводниковый («твердый») танталовый конденсатор 35 в, 47 мкф.

нормальной температуре величина z , соответствующая резонансу, у них достаточно мала, но резко возрастает при низких температурах (рис. 307, *б* и *в*). Только для оксидно-полупроводниковых конденсаторов, где электролит заменен полупроводником, сопротивление которого мало зависит от температуры, можно получить малое z при резонансе как при нормальной, так и при низкой температурах (рис. 307, *г*). Это придает особый интерес оксидно-полупроводниковым («твердым») конденсаторам, позволяя в ряде случаев применять их вместо бумажных или пленочных (с полярным диэлектриком) конденсаторов при малых значениях переменного напряжения повышенной частоты.

Дополнительные сведения по вопросу об электролитических конденсаторах различных типов можно найти во втором издании книги Л. Н. Закгейма (ГЭИ, 1963 г.).

Часть третья

КОНДЕНСАТОРЫ ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ

Глава XIV

КОНДЕНСАТОРЫ С МЕХАНИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМОЙ ЕМКОСТЬЮ

§ 92. Общая характеристика

Конденсаторы переменной емкости являются одним из наиболее важных элементов современной радиоаппаратуры, обеспечивая в большинстве случаев настройку контуров как в радиоприемной, так и в радиопередающей аппаратуре. Кроме того, они применяются достаточно широко в измерительной аппаратуре и в разнообразных устройствах электронной техники.

К рассматриваемому типу конденсаторов можно также отнести подстроечные конденсаторы (конденсаторы полупеременной емкости), у которых емкость изменяют лишь в период настройки аппаратуры при выпуске ее с завода; после того, как подобрано нужное значение емкости, оно фиксируется и конденсатор работает в дальнейшем как конденсатор постоянной емкости; новая перенастройка конденсатора производится только при ремонте данной аппаратуры.

Условные обозначения этих двух типов конденсаторов, которые мы для краткости будем называть переменными конденсаторами, были даны на рис. 1.

Изменение емкости в конденсаторах с механическим управлением достигается за счет изменения одной из двух величин, определяющих емкость: площади обкладок или зазора между обкладками. При этом в основном используются или конденсаторы плоского типа (обычно плоского многопластинчатого) или цилиндрического (трубчатого) типа. В первом случае при постоянстве зазора, согласно формулам (2) и (3), емкость конденсатора должна изменяться прямо пропорционально изменению площади перекрытия обкладок (рис. 308, а). Для

изменения последней необходимо производить механическое перемещение обкладок одного знака по отношению к обкладкам другого знака. Это перемещение, изменяющее площадь перекрытия, можно осуществлять или поступательным, или вращательным движением. Чаще всего в переменных конденсаторах применяется вращательное движение подвижной системы обкладок (ротора) по отношению к неподвижной (статору).

При изменении зазора между обкладками плоского конденсатора его емкость, согласно формуле (2),

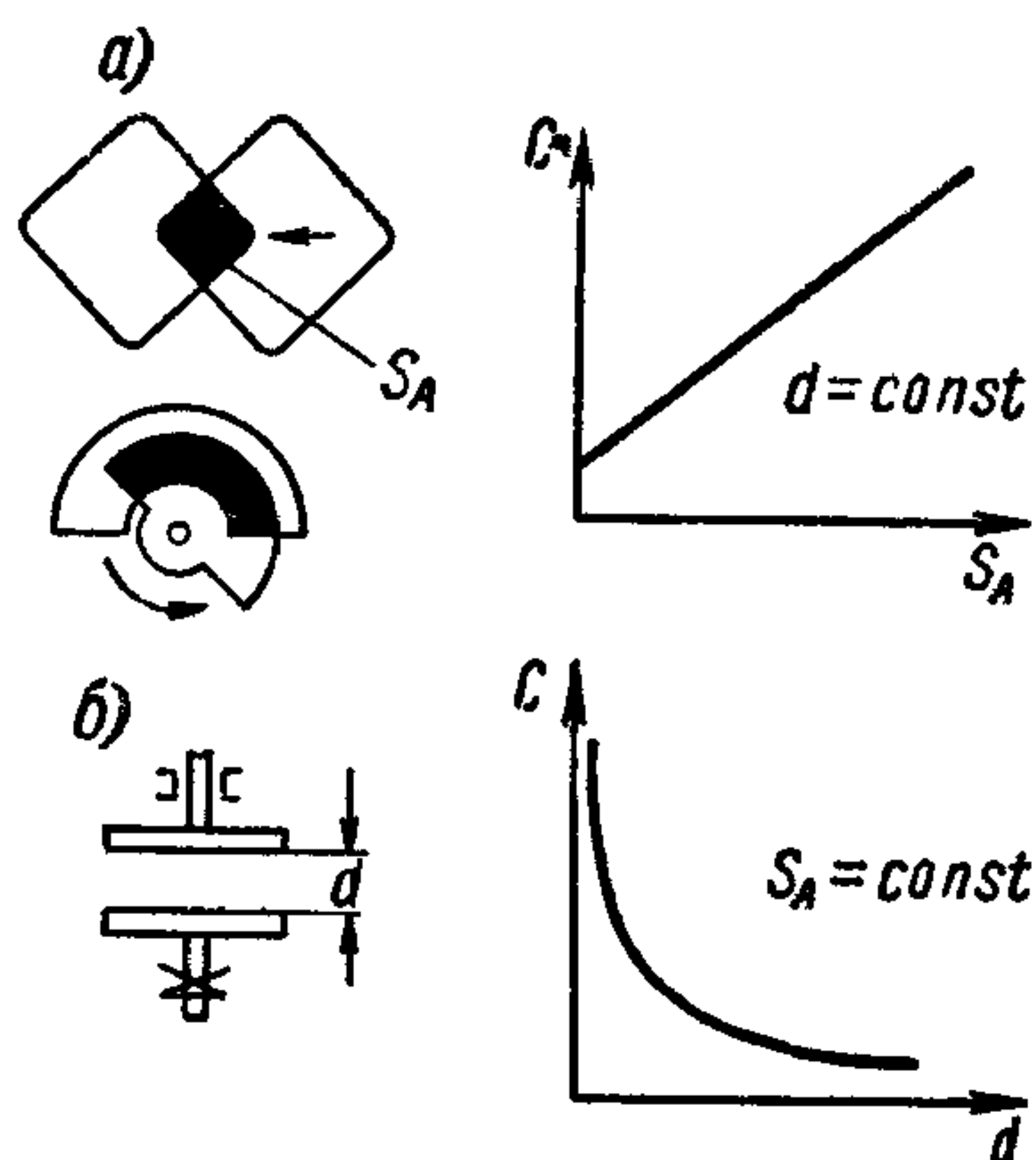


Рис. 308. Изменение емкости плоского конденсатора: а — за счет изменения площади перекрытия обкладок при поступательном или вращательном движении при постоянном зазоре; б — за счет изменения зазора при постоянной площади перекрытия обкладок.

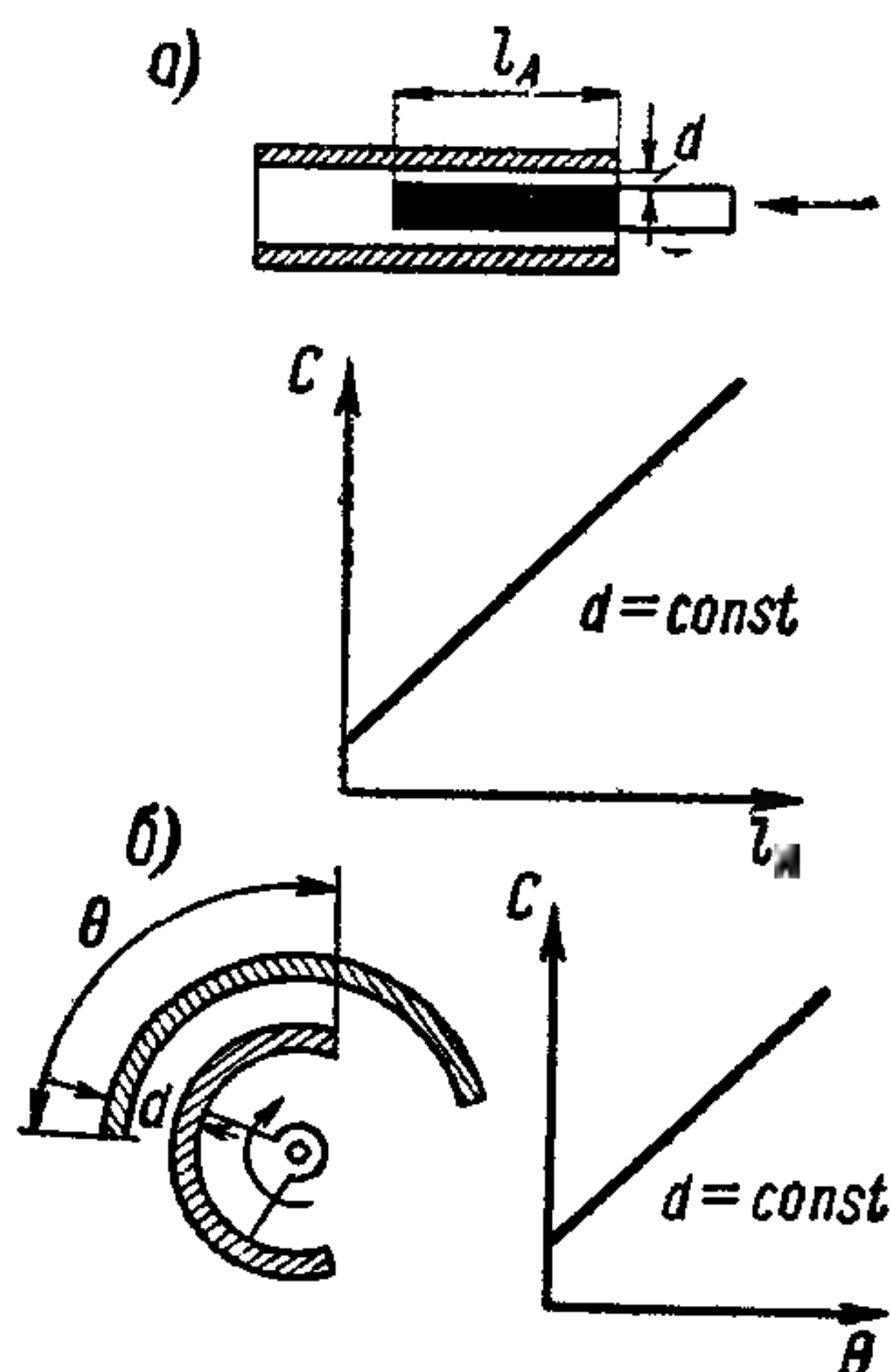


Рис. 309. Изменение емкости цилиндрического конденсатора за счет изменения активной длины обкладок (площади перекрытия) при постоянном зазоре.

должна изменяться обратно пропорционально величине зазора; при этом изменение емкости носит гиперболический характер (рис. 308, б). Для изготовления подстроечных конденсаторов малой емкости с тонкой регулировкой емкости обычно используют правую ветвь кривой, где емкость мало изменяется с изменением зазора. Левая часть кривой используется в подстроечных воздушных конденсаторах (§ 96). Неудобством этого способа изменения емкости является то, что при изменении зазора меняется пробивное напряжение конденсатора. Этот способ регулировки емкости применяется относительно редко.

При использовании цилиндрического конденсатора для изменения его емкости применяют поступательное движение внутренней обкладки по отношению к внешней, неподвижной (рис. 309, а). При этом происходит изменение длины перекрытия обкладок, пропорционально которому изменяется емкость,

согласно формуле (4). Этот принцип изменения емкости широко применяется в современных подстроечных конденсаторах. Возможно также использовать вращательное движение одного полуцилиндра по отношению к другому, получив возрастание емкости, пропорциональное увеличению площади перекрытия, зависящей от угла поворота θ , при постоянстве зазора (рис. 309, б); этот способ изменения емкости применяется редко. Изменение зазора в цилиндрическом конденсаторе можно осуществить, если внутренняя обкладка имеет ось, смещенную по отношению к оси внешней обкладки, причем мы будем поворачивать внутреннюю обкладку вокруг ее оси. Конденсатор такого типа был описан в литературе¹, но не получил распространения.

Таким образом, основными типами переменных конденсаторов, если их классифицировать по особенностям конструкции, являются:

а) плоские многопластинчатые конденсаторы с вращательным движением одной системы обкладок (пластин) по отношению к другой; применяются, преимущественно, в качестве основного типа конденсаторов переменной емкости;

б) цилиндрические конденсаторы с поступательным движением внутренней обкладки по отношению к внешней; применяются, преимущественно, в качестве основного типа подстроечных конденсаторов.

По виду диэлектрика переменные конденсаторы можно разбить на следующие типы:

а) с газообразным или жидким диэлектриком: воздушные, вакуумные, газонаполненные, маслонполненные;

б) с твердым неорганическим диэлектриком: керамические, стеклянные, воздушнослюдяные.

в) с твердым органическим диэлектриком: пластмассовые, воздушноплёночные.

По основному назначению различают конденсаторы: а — для радиоприемной аппаратуры; б — для радиопередающей аппаратуры; в — для электроизмерительной техники. В случаях а и в конденсаторы рассчитываются на небольшие напряжения, обычно не превышающие нескольких сотен вольт, а чаще — нескольких десятков вольт; в случае б при работе конденсатора в колебательном контуре большой мощности напряжения на конденсаторе могут достигать десятков киловольт.

При небольших напряжениях основным типом переменного конденсатора с механическим управлением емкостью является воздушный конденсатор плоского многопластинчатого или цилиндрического типов. Этот тип конденсатора обеспечивает возможность получения наиболее высоких электрических свойств (малый $\text{tg } \delta$, малый ТКЕ, стабильность емкости), но имеет относительно большие размеры, что ограничивает верхний предел емкости значениями порядка 500—600 пф; только для измери-

¹ E. Mullin. The Wireless Eng., 1931, VIII, № 89, p. 84—86.

тельной техники применяют относительно громоздкие переменные воздушные конденсаторы с емкостью до 1000—5000 пф .

Заливка зазоров в воздушном переменном конденсаторе жидким диэлектриком увеличивает его емкость в 2—3 раза, т. е. примерно в 2 раза при неполярных жидкостях и в 4—6 раз — при полярных, одновременно повышая и пробивное напряжение конденсатора. Однако, как было отмечено в § 61, замена воздуха жидкостью резко ухудшает электрические свойства конденсатора и требует его герметизации, что усложняет конструкцию и вызывает увеличение размеров, которое даже может свести на нет выигрыш в емкости, т. е. препятствовать существенному улучшению удельных характеристик конденсатора. Поэтому переменные конденсаторы с жидким диэлектриком применяются редко.

Значительно большее распространение получили переменные конденсаторы с твердым диэлектриком как неорганическим, так, последнее время, и органическим; в основном эти конденсаторы применяются в качестве подстроечных. У таких конденсаторов заметно улучшены удельные характеристики, но электрические свойства обычно значительно хуже, чем у воздушных конденсаторов, а потому замена воздушного конденсатора переменным конденсатором с твердым диэлектриком не всегда возможна.

При использовании твердого диэлектрика в переменном конденсаторе, когда одна обкладка должна перемещаться по отношению к другой, практически не удается исключить наличие воздушного зазора. Поэтому в таком случае мы имеем дело не с одним твердым диэлектриком, а также и с последовательно включенным слоем воздуха, что накладывает особый отпечаток на свойства этих конденсаторов.

Для применения в мощных радиопередающих устройствах, где к конденсатору прикладывается высокое напряжение высокой частоты, газовая изоляция представляет интерес прежде всего из-за возможности получения малого $\text{tg } \delta$ и высокой стабильности емкости, обеспечивающей стабильность частоты контура. Поскольку в данном случае требуется обеспечить и достаточно высокую электрическую прочность, в качестве диэлектрика в переменном конденсаторе приходится применять сжатый газ или вакуум, причем в последнее время основное развитие нашли вакуумные конденсаторы переменной емкости.

§ 93. Законы изменения емкости с углом поворота в плоских многопластинчатых конденсаторах с вращательным движением

Учитывая назначение переменного конденсатора, от него может требоваться различный характер изменения емкости в зависимости от угла поворота подвижной системы обкладок (ротора) по отношению к неподвижной (статору), т. е. различный вид функции:

$C_\theta = f(\theta)$, где C_θ есть значение емкости при некотором частном значении угла поворота θ . Заданный закон изменения емкости с углом поворота можно получить, применяя нужную форму очертания пластин ротора. Форму роторных пластин удобно характеризовать зависимостью переменного радиуса пластины ротора R_θ от угла поворота θ , применяя полярную систему координат (рис. 310). Найдем общее выражение, которое связывает форму пластины ротора, заданную выражением $R_\theta = F(\theta)$, с законом изменения емкости с углом поворота $C_\theta = f(\theta)$, который мы хотим получить в нашем конденсаторе.

Даем углу θ приращение $\Delta\theta$ настолько малое, чтобы радиус R_θ практически не изменился. Тогда приращение площади перекрытия пластин статора и ротора ΔS_θ будет представлять собой площадь кругового сектора:

$$\Delta S_\theta = \frac{R_\theta^2 \Delta\theta}{2},$$

где $\Delta\theta$ выражено в радианах (1 радиан = $57,3^\circ$). Выражая $\Delta\theta$ в градусах, получаем:

$$\Delta S_\theta = \frac{R_\theta^2 \Delta\theta}{114,6}.$$

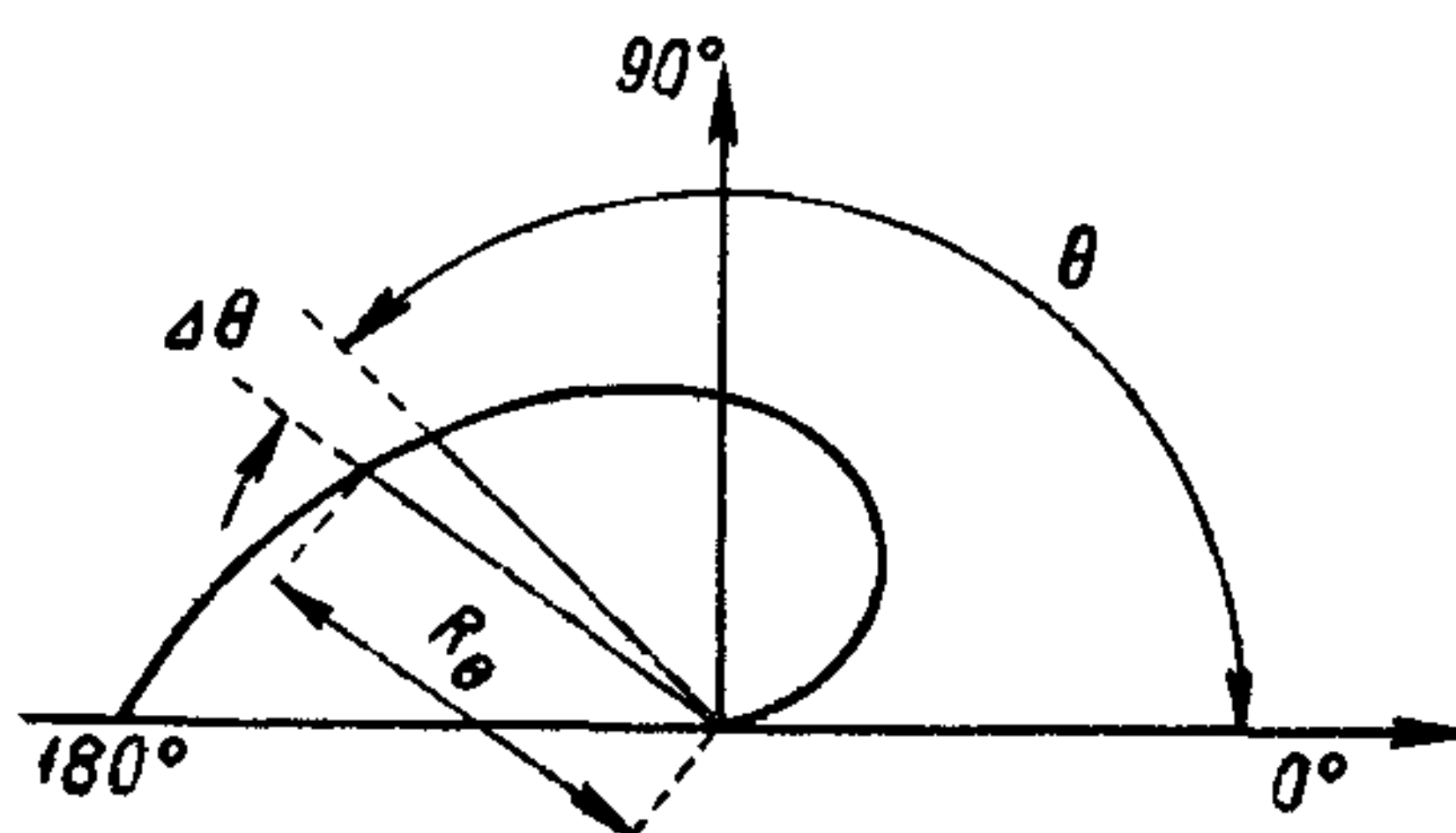


Рис. 310. К выводу формулы для кривой очертания пластины ротора.

Решая это уравнение относительно R_θ и взяв бесконечно малое значение $\Delta\theta$, получаем общее выражение в дифференциальной форме:

$$R_\theta = \sqrt{114,6 \frac{dS_\theta}{d\theta}}. \quad (300)$$

Величина S_θ представляет собой площадь, очерченную кривой $R_\theta = F(\theta)$. Активная площадь $S_{A\theta}$ перекрытия пластин статора и ротора будет меньше площади S_θ из-за наличия выреза в пластине статора для прохода оси ротора. Если радиус этого выреза будет r , то величина активной площади при некотором значении угла поворота θ будет равна:

$$S_{A\theta} = S_\theta - \frac{r^2 \theta}{114,6}. \quad (301)$$

При $\theta = 0$, т. е. при полностью выведенном роторе, емкость переменного конденсатора не равна нулю, а имеет некоторое значение C_{\min} , называемое начальной емкостью. Величина C_{\min} определяется емкостью, обусловленной наличием небольшого объема твердого диэлектрика (обязательно присутствующего во всяком конденсаторе с газообразным диэлектриком, § 56) и емкостью между торцами пластин статора и ротора.

Приращение емкости конденсатора при любом значении угла θ по отношению к начальной емкости C_{\min} будет прямо пропорцио-

нально активной площади перекрытия пластин при этом же значении θ :

$$C_\theta - C_{\min} = \frac{0,0884(N-1)}{d} \cdot S_{A\theta}, \quad (302)$$

где d — зазор между пластинами статора и ротора в см, N — полное число пластин конденсатора, $S_{A\theta}$ в см², значения емкостей в пф; для газообразного диэлектрика принято $\epsilon = 1$.

Находим значение S_θ из уравнения (301) и, подставляя значение $S_{A\theta}$ из выражения (302), получаем:

$$S_\theta = S_{A\theta} + \frac{r^2\theta}{114,6} = \frac{d(C_\theta - C_{\min})}{0,0884(N-1)} + \frac{r^2\theta}{114,6} = k_1(C_\theta - C_{\min}) + k_2\theta, \quad (303)$$

где $k_1 = \frac{d}{0,0884(N-1)} = \frac{11,3d}{N-1}$ и $k_2 = \frac{r^2}{114,6} = 8,72 \cdot 10^{-3}r^2$.

Взяв производную $dS_\theta/d\theta$ и подставив в уравнение (300), имеем:

$$R_\theta = 10,7 \sqrt{k_1 \frac{dC_\theta}{d\theta} + k_2}. \quad (304)$$

Это выражение показывает, что по заданному закону изменения емкости с углом поворота $C_\theta = f(\theta)$ мы можем найти кривую очертания пластин ротора: $R_\theta = F(\theta)$.

В электроизмерительной технике обычно применяют конденсаторы с линейным изменением емкости с углом поворота (прямоемкостные):

$$C_\theta = a\theta + b. \quad (305)$$

Используя уравнения (304) и (305), находим, что для подобных конденсаторов $R_\theta = 10,7 \sqrt{ak_1 + k_2} = \text{const}$, т. е. пластина ротора должна иметь форму полукруга (рис. 311). Значения a и b можно найти по значениям емкостей при крайних значениях угла поворота. При $\theta = 0$ $C_\theta = C_{\min}$; следовательно, $C_{\min} = b$; при $\theta = \theta_{\max}$ (обычно 180°) $C_\theta = C_{\max}$; следовательно,

$$C_{\max} = a\theta_{\max} + C_{\min}$$

откуда $a = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{\theta_{\max}}$.

Прямоемкостный конденсатор имеет равномерную шкалу емкости, что дает большое удобство при его градуировке, позволяя ограничиться проверкой емкости лишь при двух значениях угла θ .

Сдвоенный прямоемкостный конденсатор, имеющий два статора и один общий ротор (рис. 312), носит название дифференциального конденсатора. В таком конденсаторе существуют две составляющие емкости C_1 и C_2 и суммарная емкость $C = C_1 + C_2$. При вращении ротора одна из емкостей — C_1 или C_2 — линейно возрастает, а вторая линейно уменьшается; суммарная

емкость C остается неизменной при всех значениях угла поворота. Дифференциальные конденсаторы применяют в качестве двух плечей в измерительных мостовых схемах, для связи с антенной, в тонрегуляторах и т. д. В электрических схемах дифференциаль-

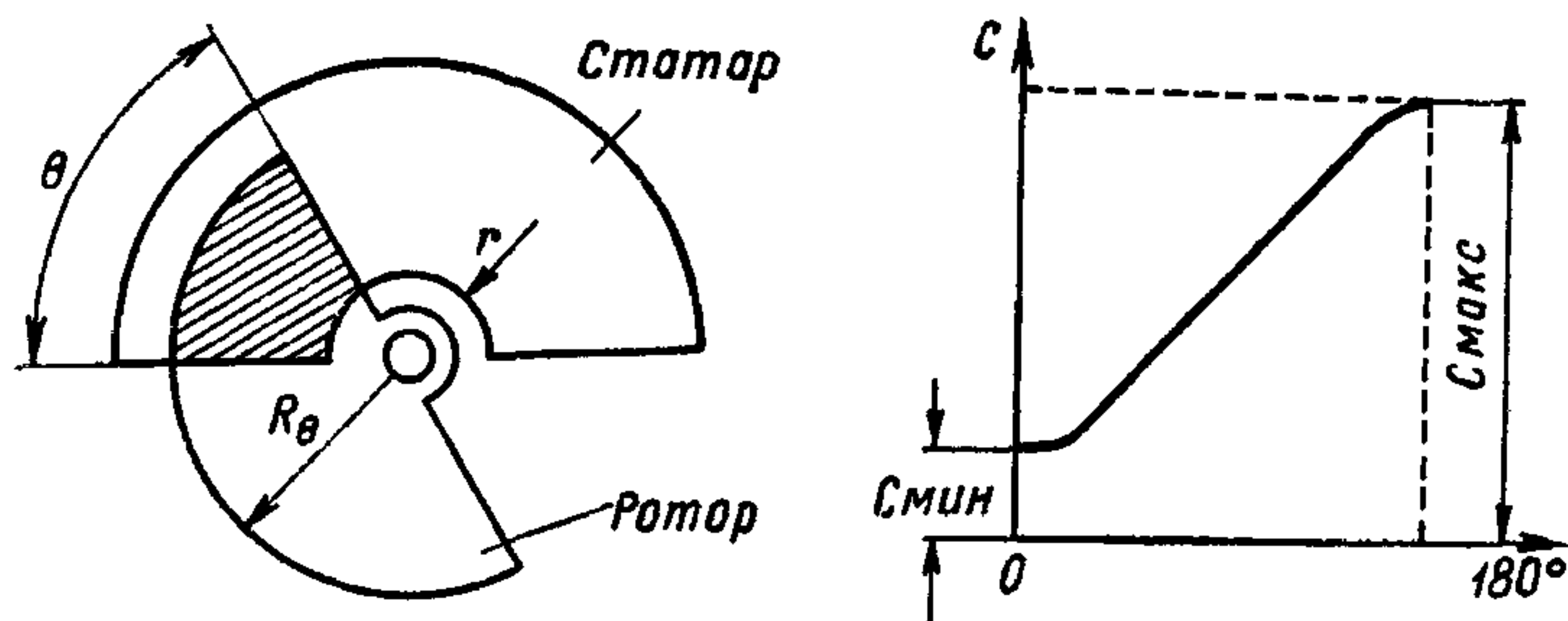


Рис. 311. Прямоемкостной переменный конденсатор.

ный конденсатор обозначают, как показано на рис. 1, з, а также иногда и другими символами, показанными на рис. 312, в.

Применение прямоемкостного конденсатора для настройки радиоконтуров неудобно, так как в этом случае желательно иметь равномерную шкалу конденсатора не в единицах емкости, а в единицах длины волны или частоты.

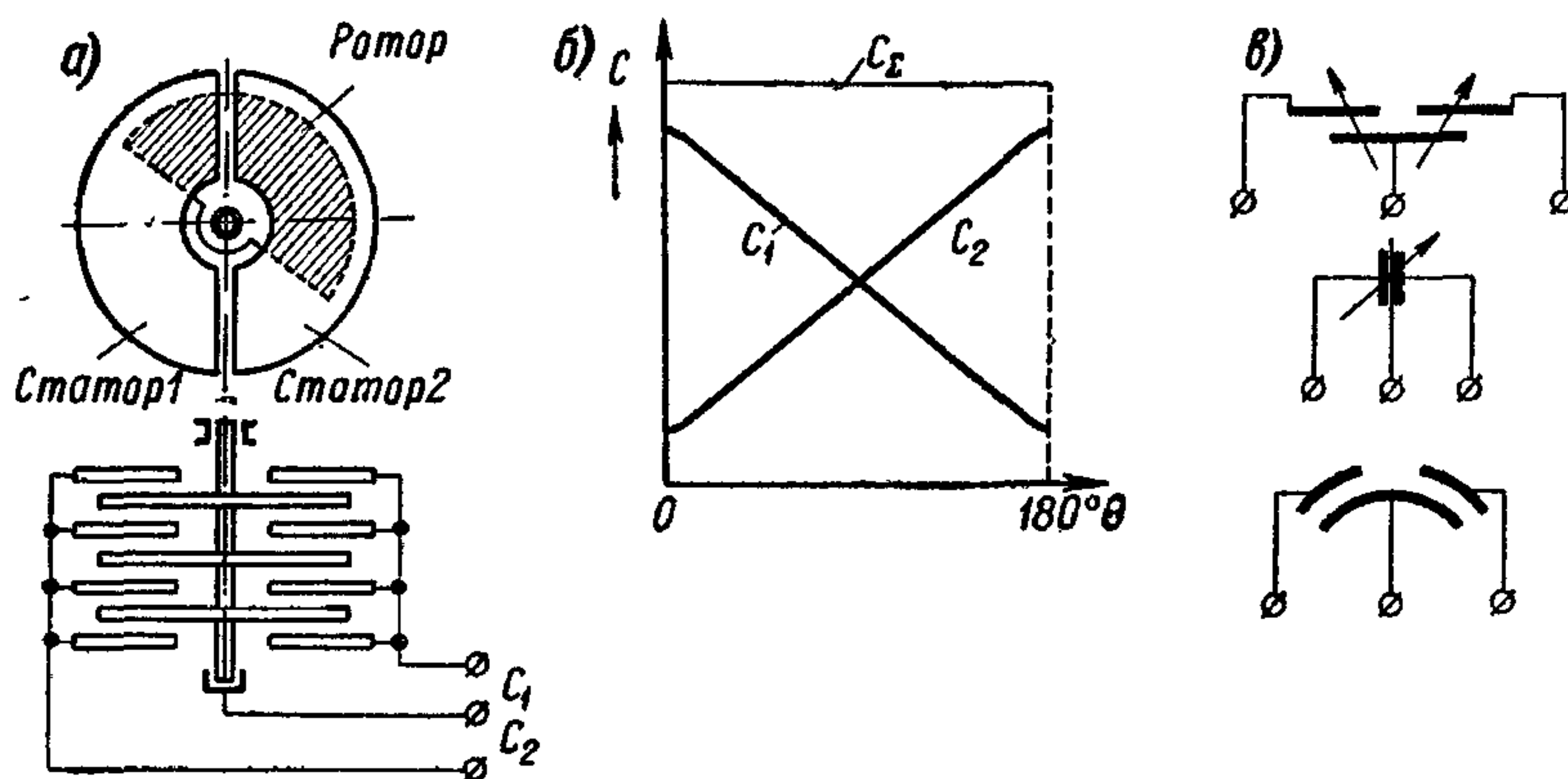


Рис. 312. Дифференциальный конденсатор: а — схема устройства; б — зависимость полной и частичных емкостей от угла поворота; в — условные обозначения в схемах.

Длина волны λ колебательного контура пропорциональна \sqrt{C} ; поэтому для получения линейной зависимости λ от угла поворота θ надо, чтобы изменение емкости с углом поворота подчинялось квадратичному закону:

$$C_\theta = (a\theta + b)^2. \quad (306)$$

Конденсатор с таким законом изменения емкости называется **прямоугольным**, или **квадратичным**. Используя далее

(304) и (306), находим для этого конденсатора уравнение очер-
тания пластины ротора:

$$R_{\theta} = 10,7 \sqrt{2k_1 a (a\theta + b) + k_2}. \quad (307)$$

Частота f колебательного контура обратно пропорциональна \sqrt{C} ; поэтому для получения линейной зависимости f от угла поворо-
та θ надо, чтобы изменение емкости с углом поворота подчиня-
лось обратно квадратичному закону:

$$C_{\theta} = \frac{1}{(a\theta + b)^2}. \quad (308)$$

Конденсатор с таким законом изменения емкости называется
п р я м о ч а с т о т н ы м, или обратно квадратичным. Подобно
предыдущему, находим для него выражение

$$R_{\theta} = 10,7 \sqrt{\frac{2k_1 a}{(a\theta + b)^3} + k_2}. \quad (309)$$

У такого конденсатора увеличение угла поворота, соответствую-
щее увеличению частоты контура, сопровождается уменьшением
емкости, поэтому направление вращения ручки конденсатора
должно быть обратным по сравнению с другими типами конден-
саторов. Поскольку с увеличением θ в данном случае C_{θ} умень-
шается, значению производной $dC_{\theta}/d\theta$ при выводе формулы (309)
надо приписать знак минус.

Иногда желательно иметь такой переменный конденсатор,
у которого точность отсчета емкости одинакова по всей шкале,
т. е. относительное приращение емкости, приходящееся на еди-
ницу приращения угла поворота, имеет постоянное значение
для всех участков шкалы:

$$\frac{\Delta C_{\theta}/C_{\theta}}{\Delta \theta} = \text{const} = b.$$

Отсюда $\frac{\Delta C_{\theta}}{C_{\theta}} = b\Delta\theta$, или в дифференциальной форме: $\frac{dC_{\theta}}{C_{\theta}} = b d\theta$.

Интегрируя это выражение, получаем $\ln C_{\theta} = a' + b\theta$

или

$$C_{\theta} = ae^{b\theta}, \quad (310)$$

где

$$a = e^{a'}.$$

Конденсатор с таким законом изменения емкости носит назва-
ние л о г а р и ф м и ч е с к о г о. Уравнение кривой очертания
пластины ротора для него имеет вид:

$$R_{\theta} = 10,7 \sqrt{k_1 a b e^{b\theta} + k_2}. \quad (311)$$

Значения постоянных a и b , зависящие от величин $C_{\text{мин}}$ и
 $C_{\text{макс}}$, так же как это было сделано выше для прямоемкостного
конденсатора, можно найти, используя крайние значения угла θ .

Выражения для вычисления этих постоянных для рассмотренных выше типов переменных конденсаторов приведены в табл. 29.

Таблица 29

Значения постоянных в уравнениях $C_{\theta} = f(\theta)$

Тип конденсатора	$C_{\theta} = f(\theta)$	a	b
Прямоемкостный	$C_{\theta} = a\theta + b$	$\frac{C_{\text{макс}} - C_{\text{мин}}}{\theta_{\text{макс}}}$	$C_{\text{мин}}$
Прямоволновый	$C_{\theta} = (a\theta + b)^2$	$\frac{\sqrt{C_{\text{макс}}} - \sqrt{C_{\text{мин}}}}{\theta_{\text{макс}}}$	$\sqrt{C_{\text{мин}}}$
Прямочастотный	$C_{\theta} = \frac{1}{(a\theta + b)^2}$	$\frac{1}{\theta_{\text{макс}}} \left(\frac{1}{\sqrt{C_{\text{мин}}}} - \frac{1}{\sqrt{C_{\text{макс}}}} \right)$	$\frac{1}{\sqrt{C_{\text{макс}}}}$
Логарифмический	$C_{\theta} = ae^{b\theta}$	$C_{\text{мин}}$	$\frac{\lg C_{\text{макс}} - \lg C_{\text{мин}}}{0,435 \theta_{\text{макс}}}$

При вычислении a и b , согласно табл. 29, значения $C_{\text{мин}}$ и $C_{\text{макс}}$ подставляются в пикофарадах.

Строго говоря, при этих вычислениях в формулы табл. 29 надо подставлять вместо $C_{\text{мин}}$ и $C_{\text{макс}}$ соответственно $C_{\text{мин}} + C_0$ и $C_{\text{макс}} + C_0$, где C_0 — собственная емкость контура, в котором будет использоваться данный конденсатор (емкость соединительных проводников, емкость катушки индуктивности и т. д.).

При расчете конденсаторов, как указано выше, обычно принимают $\theta_{\text{макс}} = 180^\circ$. Вопрос о расчете конденсаторов с углом поворота, превышающим 180° , рассмотрен П. Г. Пановым и С. А. Фрейкиным¹.

Если закон изменения емкости отличается от прямолинейного, то форма пластины ротора отличается от полукруга; если при этом приходится обеспечивать значительное изменение частоты контура, то пластина ротора приобретает вытянутую форму, с длинным «хвостом», что конструктивно неудобно и снижает устойчивость работы конденсатора.

В этом случае каждую вытянутую пластину можно заменить набором укороченных пластин переменной формы; их конфигурация подбирается с таким расчетом, чтобы сохранить заданный закон изменения емкости с углом поворота, который обеспечивался пластинами вытянутой формы. Конденсатор с пластинами переменной формы носит название *верного*. Расчет таких конденсаторов рассмотрен П. Г. Пановым².

Для повышения устойчивости конденсаторов (за счет увеличения жесткости конструкции) применяют ротор с постоянным

¹ П. Г. Панов, С. А. Фрейкин. — «Радиотехника», 1950, № 2, с. 31.

² П. Г. Панов. — «Изв. эл. пром. сл. тока», 1941, № 5, с. 27.

радиусом, а необходимый закон изменения емкости с углом поворота обеспечивают специальным вырезом с переменным радиусом в пластине статора (рис. 313). Для вычисления этого переменного радиуса, очерчивающего вырез в пластинах статора, можно использовать уравнение:

$$R'_\theta = \sqrt{R_{\text{макс}}^2 + r^2 - R_\theta^2}. \quad (312)$$

Здесь R_θ вычисляется по формуле (304), а r — радиус выреза в пластине статора, который надо было бы делать, если бы ротор имел форму, выражаемую уравнением (304), $R_{\text{макс}}$ — максимальное значение R_θ .

Практически при изготовлении переменных конденсаторов с законом изменения емкости, отличным от прямолинейного,

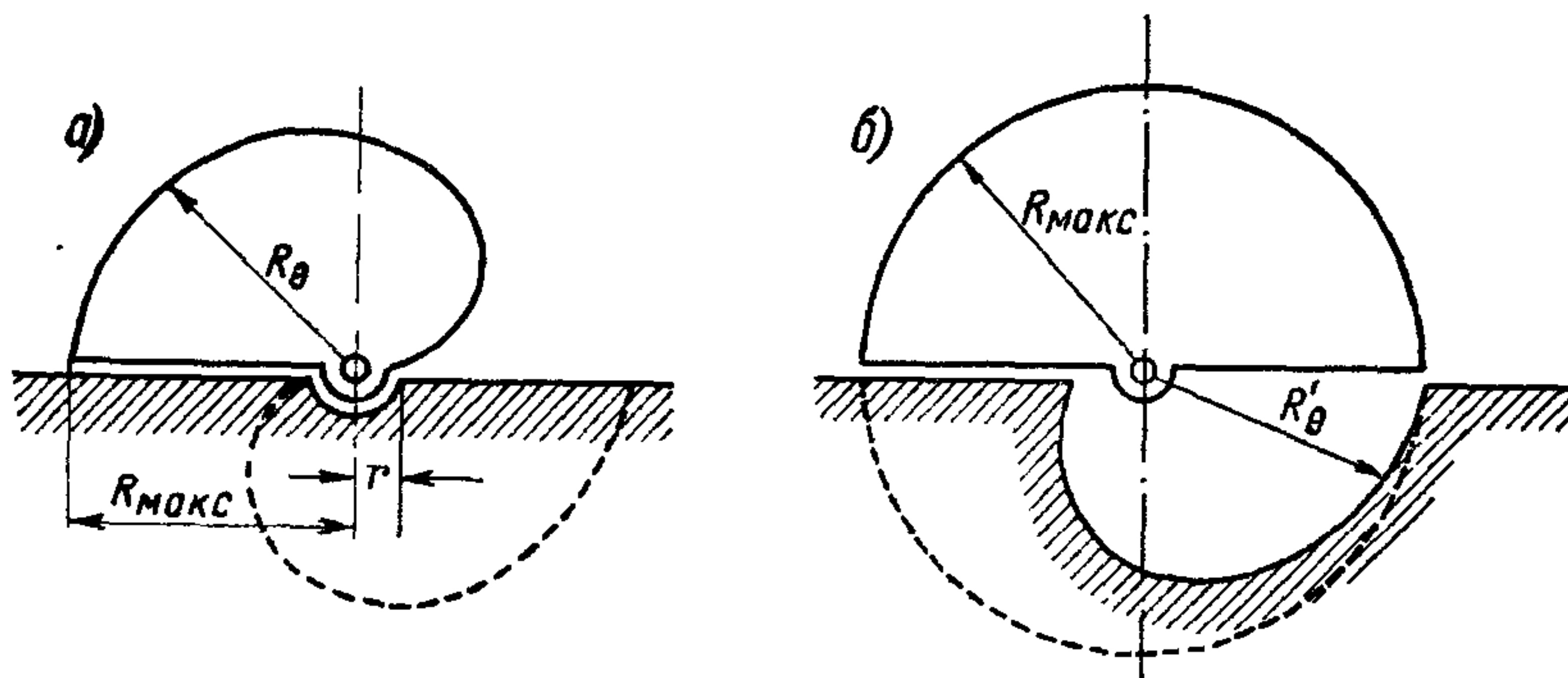


Рис. 313. Замена ротора с переменным радиусом R_θ (а) на круглый ротор и вырез в статоре с переменным радиусом R'_θ (б).

сложные кривые $R_\theta = F(\theta)$, характеризующие очертания пластин ротора, заменяют двумя-тремя окружностями для облегчения изготовления штампов для вырубki роторных пластин.

На крайней пластине ротора обычно делают радиальные прорезы, разбивающие пластину на несколько участков. Подгибая тот или иной участок, можно изменить емкость в определенном интервале угла поворота для подгонки фактической кривой $C_\theta = f(\theta)$ к заданному закону изменения емкости с углом поворота.

Входящие в обычную формулу (304) конструктивные постоянные k_1 и k_2 зависят от зазора d , числа пластин N и радиуса выреза в статоре r . Величина зазора выбирается из соображений об электрической прочности воздуха, причем $E_{\text{раб}}$ берут до 0,6—0,75 от $E_{\text{пр}}$. При зазорах порядка 1—10 мм в однородном поле для воздуха амплитудное значение пробивной напряженности равно 4,5—3,3 кВ/мм, что соответствует действующему значению при частоте 50 Гц, равному 3,2—2,3 кВ/мм. Даже при полированных пластинах с закругленными краями поле в воздушном конденсаторе нельзя считать вполне однородным; кроме того, надо считать, что при увеличении суммарной площади пластин по сравнению с элек-

тродами малой площади в разрядниках для исследования $E_{\text{пр}}$ воздуха, вероятность наличия дефектов поверхности, увеличивающих локальную напряженность поля, возрастает, что приводит к снижению $E_{\text{пр}}$; наконец, известное снижение $E_{\text{пр}}$ воздуха может иметь место при высоких частотах. Поэтому обычно принимают $E_{\text{ис}}$ порядка 1 кВ/мм , а $E_{\text{раб}} = 0,5 \div 0,7 \text{ кВ/мм}$ при нормальном давлении воздуха. Если конденсатор рассчитывается на использование в высотной аппаратуре, то необходимо еще учесть снижение электрической прочности воздуха при больших высотах (§ 43).

При малых напряжениях величина d выбирается минимально возможной из технологических и конструктивных соображений, чтобы исключить возможность короткого замыкания пластин. Для конденсаторов небольших размеров в условиях массового производства получают минимальное значение зазора до $0,25 \text{ мм}$, при очень тщательной технологии можно довести это значение до $0,1\text{—}0,15 \text{ мм}$, как указывает С. Х. Азарх.

В английском патенте H1M/H01g № 1 030 112, 1962 г. предлагается для получения столь малых зазоров ставить на пластины статора и ротора маленькие дистанционные прокладки из полистирола в виде заклепок, установленных в отверстиях пластин, с высотой головок $0,05\text{—}0,10 \text{ мм}$.

Величину радиуса выреза в статоре r , учитывая увеличенную неоднородность поля между осью ротора и краем пластины статора, обычно выбирают с таким расчетом, чтобы зазор между осью (или надетой на нее втулкой) и пластиной статора был бы не менее $2d$. Общее число пластин конденсатора N выбирается из конструктивных соображений, чтобы получить желательное соотношение между площадью пластин и высотой конденсатора.

§ 94. Воздушные конденсаторы переменной емкости

Выше уже отмечалось, что при небольших напряжениях, порядка сотен вольт и ниже (в отдельных случаях — до нескольких киловольт), воздушные конденсаторы являются основным типом конденсатора переменной емкости.

Они находят широкое применение в современной электронной технике: для настройки радиовещательной аппаратуры, для усилительных каскадов профессиональных приемников, для гетеродинов профессиональных приемников и задающих генераторов маломощных передатчиков, для выходных каскадов передатчиков, для различной измерительной аппаратуры и т. п.

Размеры конденсаторов зависят от величины $C_{\text{макс}}$ и зазора между пластинами, который, как указано выше, может достигать до $0,1\text{—}0,15 \text{ мм}$; обычно в конденсаторах длинноволнового и средневолнового диапазона зазор составляет $0,25\text{—}0,5 \text{ мм}$ при значениях $C_{\text{макс}}$ до $500\text{—}600 \text{ пф}$ и имеет величину порядка $0,8\text{—}1 \text{ мм}$ для конденсаторов коротковолнового диапазона небольшой ем-

кости. При $C_{\text{макс}} = 500 \text{ нф}$ и зазоре $0,25 \text{ мм}$ удельная емкость воздушного переменного конденсатора составляет $5\text{--}6 \text{ нф/см}^3$, что позволяет размещать конденсаторы с таким значением емкости в обычной аппаратуре; переход от радиоламп к полупроводниковым приборам и связанная с этим миниатюризация радиоаппаратуры требуют значительного повышения $\epsilon_{\text{уд}}$, чтобы размеры переменного конденсатора могли соответствовать размерам аппарата в целом. Отсюда увеличенное внимание к конденсаторам переменной емкости с твердым диэлектриком, в частности из синтетических пленок.

Толщина пластин в обычных воздушных конденсаторах составляет $0,5\text{--}1 \text{ мм}$, материал — алюминий или латунь; в особо мало-

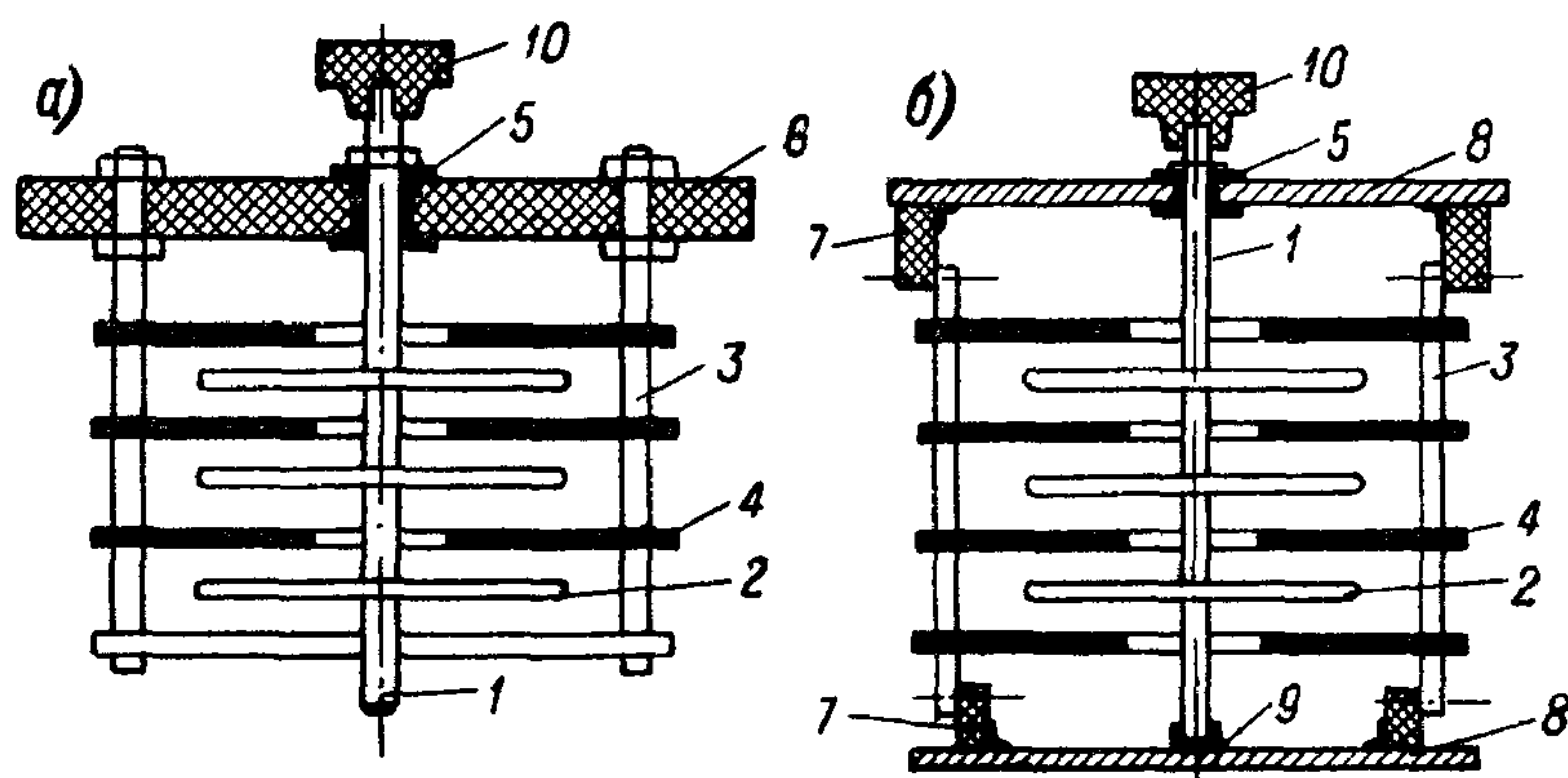


Рис. 314. Изоляция статора от ротора: *а* — керамической платой; *б* — керамическими изоляторами.

1 — ось ротора; 2 — пластина ротора; 3 — стойка статора; 4 — пластина статора; 5 — подшипник; 6 — керамическая плата; 7 — керамический изолятор; 8 — металлическая плата; 9 — подпятник; 10 — ручка оси ротора.

габаритных конденсаторах могут быть и более тонкие пластины до $0,25\text{--}0,3 \text{ мм}$; ось ротора обычно изготавливается из латуни. В качестве твердого диэлектрика в воздушных переменных конденсаторах теперь обычно применяют высокочастотную установочную керамику (§ 68). Для малогабаритных конденсаторов часто применяют плату из керамики, на которой закрепляются подшипник ротора и стойки статора; в конденсаторах большего размера применяется металлическая плата (корпус), на которой стойки статора крепятся с помощью маленьких керамических изоляторов (рис. 314).

Для крепления пластин статора на стойках и пластин ротора на его оси применяют различные методы: расчеканку, пайку, разделительные шайбы и стяжку гайками, заливку легкоплавким сплавом. Ранее применялась также цельнофрезерованная система, когда статор и ротор изготавливались из литых заготовок, в которых с помощью специального набора тонких фрез прорезались зазоры,

образующие систему пластин. Такая конструкция обеспечивает хорошую стабильность емкости и малые потери в металлических частях, но утяжеляет и удорожает конденсатор, а потому ее применяют редко.

Подвод тока к ротору через подшипник, смонтированный на металлической плате, считается теперь недостаточно надежным, так как переменный контакт будет вызывать помехи в виде шумов. В связи с этим было предложено использовать спиральные пружинки или гибкие проволочные канатики, один из концов которых непосредственно припаивался к оси ротора. Этот способ неудобен тем, что вызывает увеличение индуктивности конденсатора, а также приводит к «обрыву» при разрушении про-

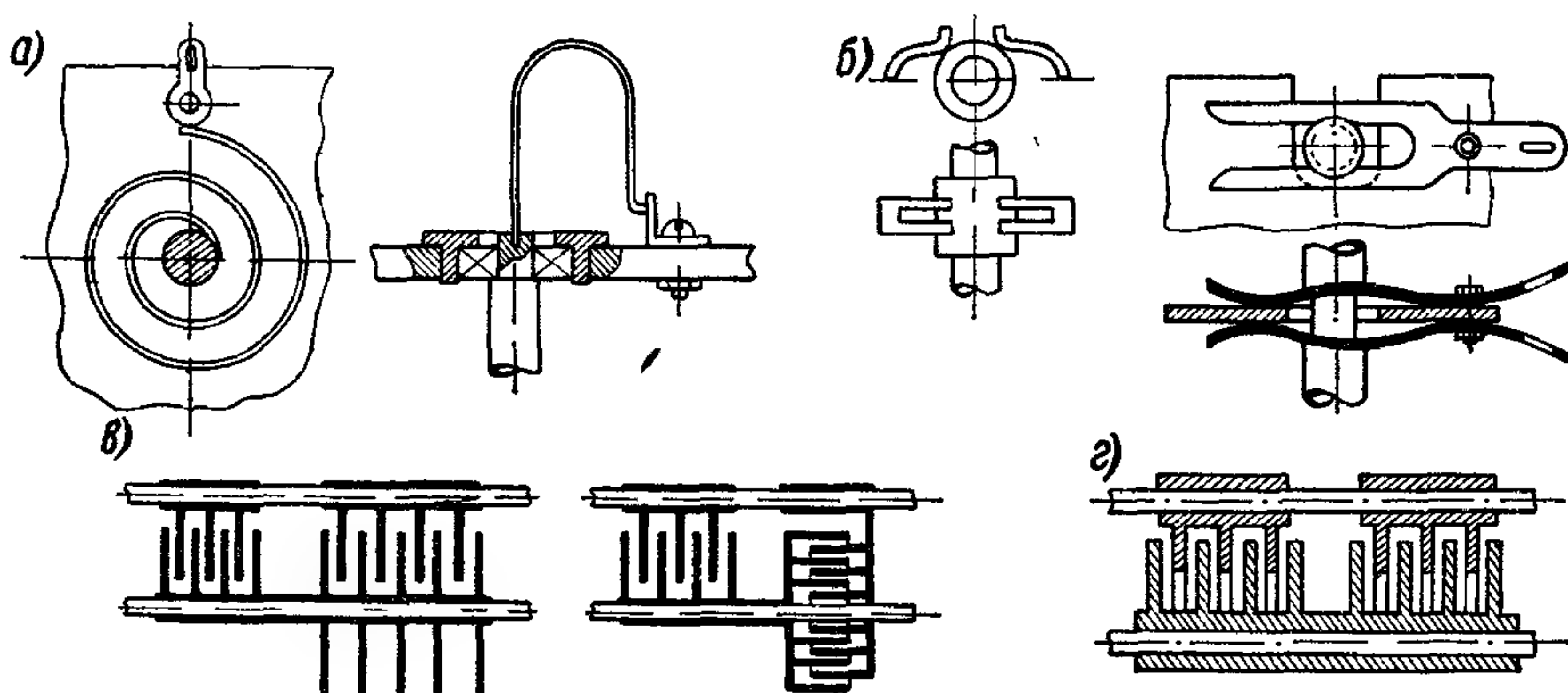


Рис. 315. Различные типы токосъемов (подвода тока к ротору): а — гибкие токосъемы (слева пружина, справа — канатик); б — пружинные токосъемы (слева с контактным кольцом на оси, справа — контакт непосредственно с осью); в — емкостные бесконтактные токосъемы (слева — пластинчатый, справа — цилиндрический); г — конденсатор с нейтральным ротором.

водника или пружинки при многократных перегибах. Поэтому чаще применяют контактный диск, надеваемый на ось ротора, и плотно прижатую к нему пружину, соединяемую с выводом; в конденсаторах для УКВ применяют также разрезные цанги, надеваемые на ось ротора и прижимаемые к ней спиральной пружиной. В области УКВ иногда применяются емкостные (бесконтактные) токосъемы, обеспечивающие отвод тока от ротора через добавочную емкость (рис. 315); недостатком этого способа является увеличение размеров конденсатора и его удорожание. Одним из вариантов емкостного токосъема является конденсатор с нейтральным ротором, представляющий собой два конденсатора с одинаковым законом изменения емкости, соединенных последовательно; емкость каждой секции такого конденсатора в два раза больше необходимой общей емкости.

За рубежом подобные конденсаторы называют также конденсаторами с расщепленным статором

(split-stator). Одним из вариантов подобных конденсаторов является конденсатор типа «бабочка» (Butterfly). Конденсаторы такого типа, применяемые при частотах выше 100—200 Мгц, представляют собой устройства, в которых индуктивность и емкость являются интегральными частями колебательного контура. На рис. 316, а показана схема типа «полубабочка» (Semi-butterfly). Статорные пластины конденсатора поддерживаются полукруглой полосой, создающей индуктивность. Ротор не только образует с пластинами статора воздушный конденсатор, но и действует как экран, блокирующий вихревыми токами часть пространства, в котором создается магнитное поле. Когда ротор полностью введен, $C = C_{\text{макс}}$, а индуктивность L равна индуктивности полукруглой полосы. Когда ротор полностью выведен, $C = C_{\text{мин}}$ и индуктивность также уменьшается в результате экранирующего эффекта ротора. Таким образом, вращая ротор, мы меняем как емкость, так и индуктивность системы. Схематическое изображение конденсатора (правильнее, контура) типа «бабочка» показано на рис. 316, б. Этот контур можно рассматривать как два параллельно соединенных контура, показанных на рис. 316, а. Ротор в этой конструкции расположен симметрично между выводами А и В, изменение его емкости относительно земли не влияет на равновесие схемы. Устранение большого выреза между пластинами статора и полукольцевым индуктором, характерного для системы «полубабочка», улучшает механическую стабильность системы и ослабляет ее зависимость от температуры.

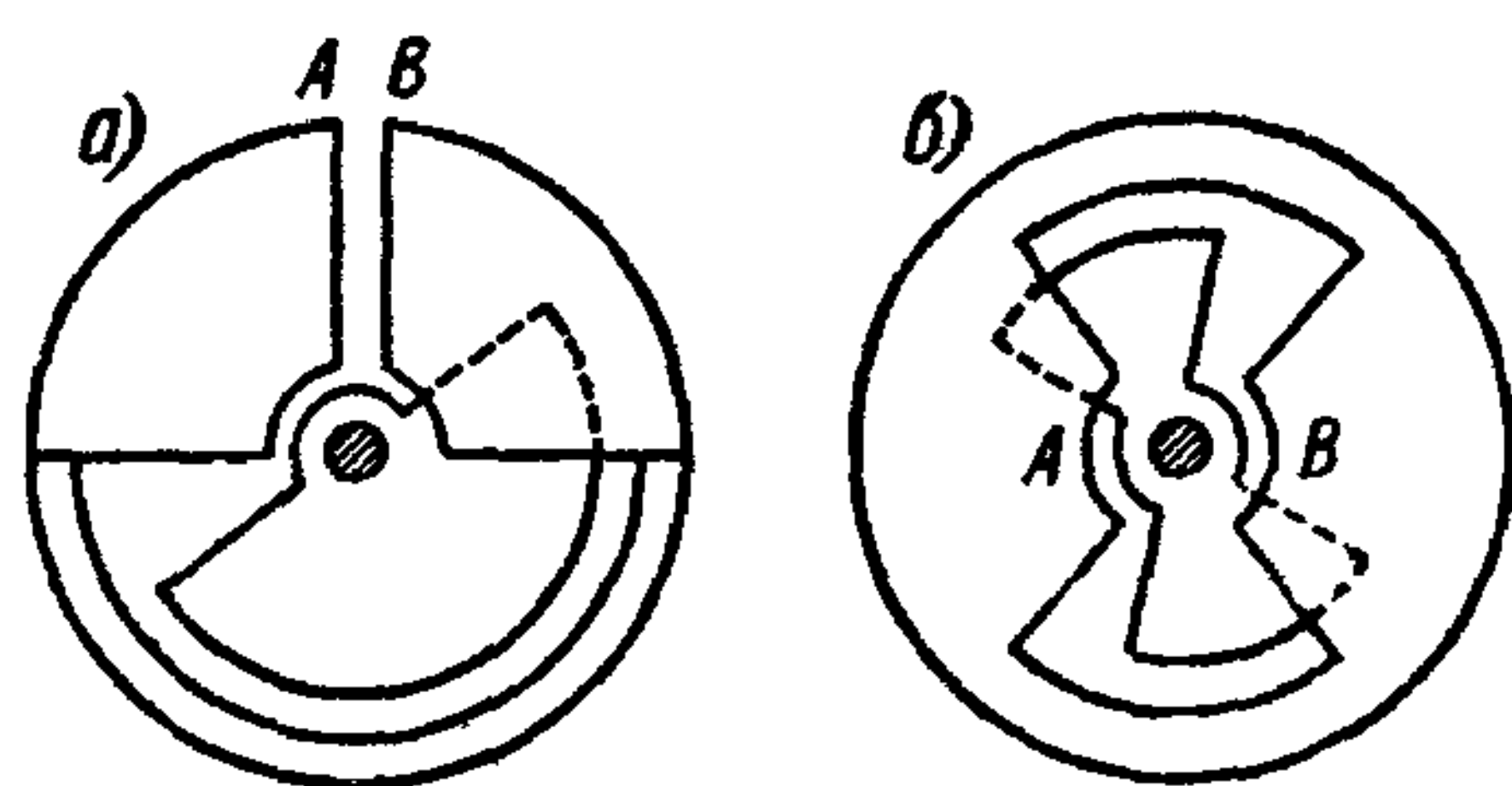


Рис. 316. Конденсаторы типа «полубабочка» (а) и типа «бабочка» (б); А и В — место расположения выводов.

При дистанционном управлении емкостью переменного конденсатора и при автоматической настройке используются мало-мощные электродвигатели, размеры и вес которых в значительной степени определяются моментом вращения конденсатора; поэтому приходится добиваться снижения величины момента вращения. Он зависит от качества и конструкции подшипников и подпятников, наличия трущихся токоъемов, от размеров и степени балансировки ротора и т. п. В многосекционных конденсаторах с трущимся токоъемом момент вращения составляет 200—500 Г·см, при емкостном токоюме можно снизить его до 125—150 Г·см, а в односекционных конденсаторах такого типа — до 20—40 Г·см. Наличие смазки, загустевающей при охлаждении, приводит к увеличению момента вращения при нижнем пределе рабочей температуры —60° С в 2—3 раза. Для обозначения многосекционных переменных конденсаторов («блоков») в схемах применяется символ, показанный на рис. 1, ж.

Значение $C_{\text{мин}}$, т. е. н а ч а л ь н о й е м к о с т и переменного конденсатора, зависит от его конструктивных особенностей и для обычных конденсаторов с плоскими пластинами составляет 5—20% от $C_{\text{макс}}$, имея абсолютные значения порядка 5—15 пф. Обычно допуск на величину $C_{\text{мин}}$ порядка $\pm 5\%$ считается достаточным, так как точная подгонка этого значения достигается регулировкой параллельно подключаемого подстроечного конденсатора.

Значение $C_{\text{макс}}$, т. е. м а к с и м а л ь н о й е м к о с т и, зависит от перекрываемого диапазона частот $k_f = f_{\text{макс}}/f_{\text{мин}}$, от $C_{\text{мин}}$ и от собственной емкости контура C_0 :

$$C_{\text{макс}} = k_f^2 (C_{\text{мин}} + C_0) - C_0. \quad (313)$$

Обычно в приемниках с длинноволновым и средневолновым диапазоном (менее 3 Мгц) применяют $C_{\text{макс}} = 350 \div 600$ пф, в коротковолновых приемниках и передатчиках (3—30 Мгц) — $C_{\text{макс}} = 120 \div 250$ пф, а в аппаратуре УКВ (частота выше 30 Мгц) — $C_{\text{макс}} = 20 \div 50$ пф. Коэффициент перекрытия по частоте k_f в аппаратуре связи обычно составляет 1,2—2,5. В длинноволновых и средневолновых приемниках k_f доходит до 3—3,5.

От современных конденсаторов требуется, чтобы т о ч н о с т ь изменяемой части емкости ($C_0 - C_{\text{мин}}$) при любом угле поворота составляла 0,5—1%. Для прецизионных переменных конденсаторов, применяемых для точных измерений, требуют еще большую точность; некоторые зарубежные фирмы гарантируют отклонение $C_{\text{макс}}$ от номинального значения не более $\pm 0,1\%$, а иногда даже $\pm 0,01\%$. Деления на шкале при такой точности приходится рассматривать через специальную лупу.

Вопрос о величине температурного коэфффициента емкости (ТКЕ) переменного конденсатора сложнее, чем в случае конденсаторов постоянной емкости, так как у переменного конденсатора ТКЕ изменяется при изменении угла поворота. При этом можно рассматривать две его составляющие: α_1 — постоянную, соответствующую $C_{\text{мин}}$, и α_2 — переменную, соответствующую переменной части емкости ($C_0 - C_{\text{мин}}$) и зависящую от угла поворота θ . Полное значение ТКЕ связано с его составляющими соотношением

$$\text{ТКЕ} = \frac{\alpha_1 C_{\text{мин}} + \alpha_2 (C_0 - C_{\text{мин}})}{C_0}. \quad (314)$$

Обычно $\alpha_1 > \alpha_2$, так как в величине $C_{\text{мин}}$ более 30% приходится на долю емкости через твердый диэлектрик (керамику) с увеличенным значением ТКЕ. Согласно формуле (314), в связи с этим, даже если бы $\alpha_2 = \text{const}$, общая величина ТКЕ должна была бы снижаться с увеличением θ , т. е. с увеличением общей емкости конденсатора C_0 . Фактически величина α_2 , зависящая от расширения пластин, смещения роторных пластин относительно статорных, изменения зазора при изменении температуры и т. д.,

обычно несколько снижается с увеличением угла поворота, что усиливает уменьшение общего ТКЕ с увеличением введенной емкости C_θ .

Норма на величину ТКЕ воздушных переменных конденсаторов, применяемых в широкополосных приемниках, указываемая при значении $C_{\text{макс}}$, обычно составляет не более $200 \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, фактически ТКЕ составляет $\pm(50 \div 100) \times 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; при значении $C_{\text{мин}}$ величина ТКЕ может быть больше. Для образцовых переменных конденсаторов, предназначенных для электроизмерительной техники, при использовании температурной компенсации (например, по рис. 147) удается получать значения ТКЕ до $\pm(5 \div 10) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Угол потерь переменного конденсатора также изменяется при изменении угла поворота θ , т. е. с изменением введенной емкости.

Зависимость $\text{tg } \delta$ переменного воздушного конденсатора от величины введенной емкости C_θ и от частоты f можно представить приближенной формулой

$$\text{tg } \delta = 2\pi f C_\theta r_m \cdot 10^{-12} + \frac{C_d}{C_\theta} \text{tg } \delta_d + \frac{10^{12}}{2\pi f C_\theta R_{\text{п}}}, \quad (315)$$

где r_m — сопротивление металлических частей конденсатора в ом, C_d — емкость, обусловленная твердым диэлектриком в пф, $\text{tg } \delta_d$ — тангенс угла потерь этой емкости, $R_{\text{п}}$ — сопротивление изоляции, обусловленное поверхностной утечкой по твердому диэлектрику в ом, f — в гц, C_θ — в пф.

Формула (315) показывает, что при $C_\theta = \text{const}$ величина $\text{tg } \delta$ должна проходить через минимум при некотором значении f , а при $f = \text{const}$ — при некотором значении C_θ . Такой характер зависимостей $\text{tg } \delta = F'(f)$ и $\text{tg } \delta = F''(C_\theta)$ подтверждается опытом (рис. 317). Для доброкачественных образцовых переменных конденсаторов $\text{tg } \delta$ в диапазоне частот 10^3 — 10^6 гц обычно лежит ниже 10^{-5} (твердый диэлектрик — плавленый кварц). Повышение $\text{tg } \delta$ в области низких частот обусловлено потерями в твердом диэлектрике и потерями в слое окислов на поверхности пластин (для повышения устойчивости к окислению пластины иногда покрывают слоем родия); повышение $\text{tg } \delta$ в области высоких частот обусловлено увеличением потерь в металле; в хорошем конденсаторе сопротивление между выводом статора и любой его пластиной, а также между любой пластиной ротора и корпусом не должно превышать 0,002 ома. Те же причины объясняют и зависимость $\text{tg } \delta$ от C_θ .

Для радиоконденсаторов массового выпуска $\text{tg } \delta$ при $C_{\text{макс}}$ может достигать величин порядка $10 \div 30 \cdot 10^{-4}$, при $C_{\text{мин}}$ значения $\text{tg } \delta$ могут быть еще выше.

Следует иметь в виду, что значения ТКЕ и $\text{tg } \delta$ воздушных конденсаторов могут заметно ухудшаться при воздействии повышенной влажности (увеличение ТКЕ влажного воздуха, рис. 148,

осаждение пленки влаги на поверхности пластин, увеличение утечки по поверхности твердого диэлектрика и т. д.). Поэтому в ответственных случаях приходится герметизировать конденсатор

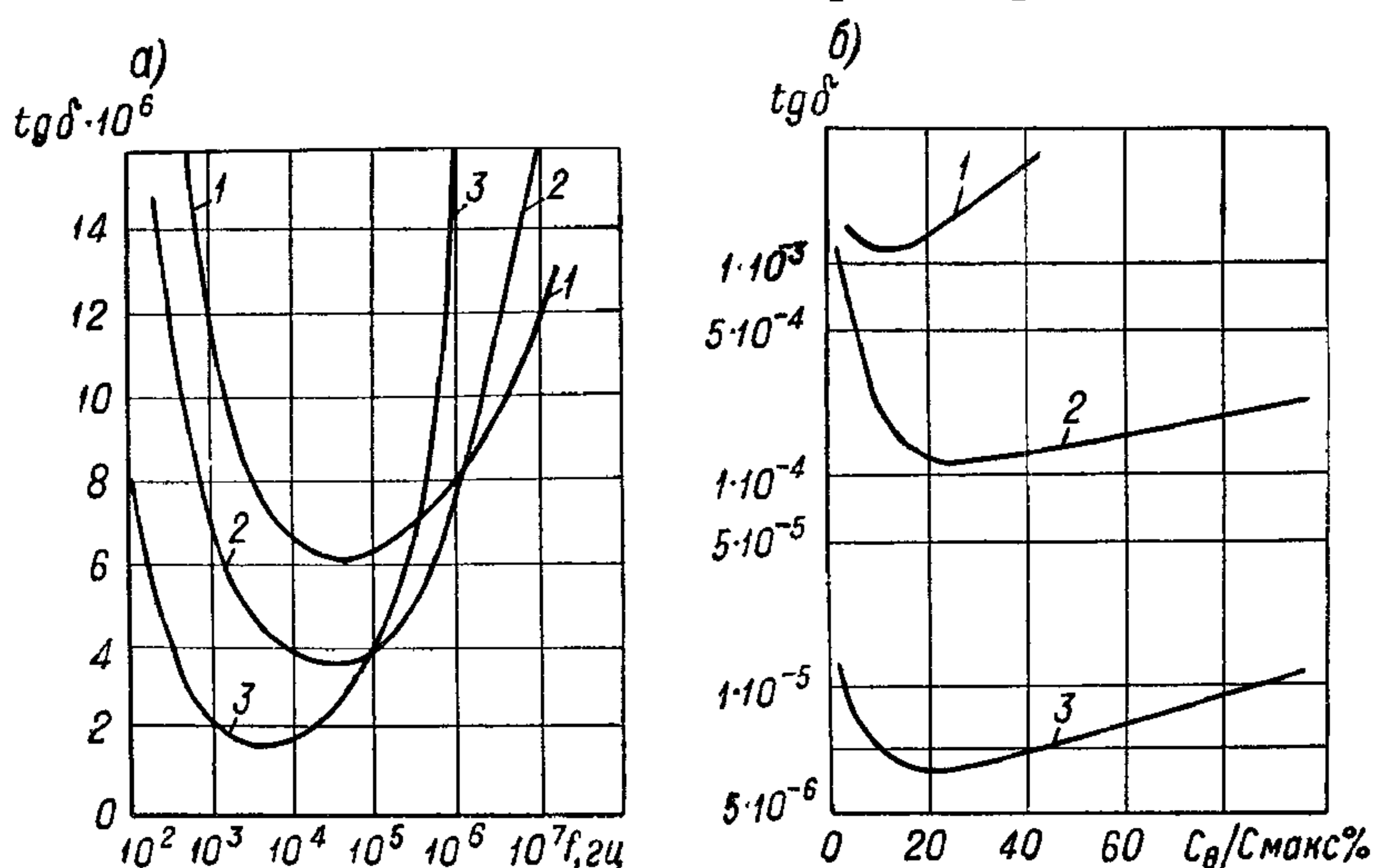


Рис. 317. Тангенс угла потерь воздушного переменного конденсатора: а — зависимость от частоты при трех постоянных значениях введенной емкости

(1 — $C_\theta = 0,125 C_{\text{макс}}$; 2 — $C_\theta = 0,25 C_{\text{макс}}$; 3 — $C_\theta = C_{\text{макс}} = 2000 \text{ пф}$);

б — зависимость от введенной емкости (от угла поворота) при трех видах твердого диэлектрика ($f = 1 \text{ МГц}$).

1 — эбонит; 2 — высокочастотная керамика; 3 — плавленый кварц.

или применять уплотнение корпуса эластомером и помещать внутрь корпуса силикагель или какой-либо иной поглотитель влаги.

Подробные сведения о воздушных переменных конденсаторах можно найти в книге С. Х. Азарха («Энергия», 1965 г.).

§ 95. Воздушные подстроечные конденсаторы

Воздушные конденсаторы полупеременной емкости (подстроечные) изготавливаются плоского и цилиндрического типов. В первом случае они представляют собой миниатюрные конденсаторы переменной емкости плоского многопластинчатого типа (микроконденсаторы) со стопорным устройством и радиусом ротора 10 мм, зазор — до 0,25 мм, твердый диэлектрик — высокочастотная керамика. Типовая конструкция подстроечного конденсатора показана на рис. 318, а. Подобные конденсаторы обычно изготавливаются в трех вариантах: а) прямоемкостной обычный конденсатор с углом поворота 180° ; б) конденсатор типа «бабочка» с углом поворота 90° для подстройки высокочастотных контуров в диапазонах УКВ и ДЦВ; в) дифференциальный конденсатор. Обычные значения $C_{\text{макс}}$ для подстроечных кон-

денсаторов: 4—5 $nф$ для диапазона ДЦВ, 8—12 $nф$ для УКВ и 25—30 $nф$ для контуров средних и длинных волн; реже применяются значения C_{\max} порядка 50—60 $nф$. В старой серии конденсаторов МПК применялись значения $C_{\min} = 3 \div 5 nф$ и $C_{\max} = 6 \div 62 nф$; в новой серии КПВМ для обычных конденсаторов $C_{\min} = 1,5 \div 3 nф$ и $C_{\max} = 7 \div 26 nф$; для конденсаторов типа

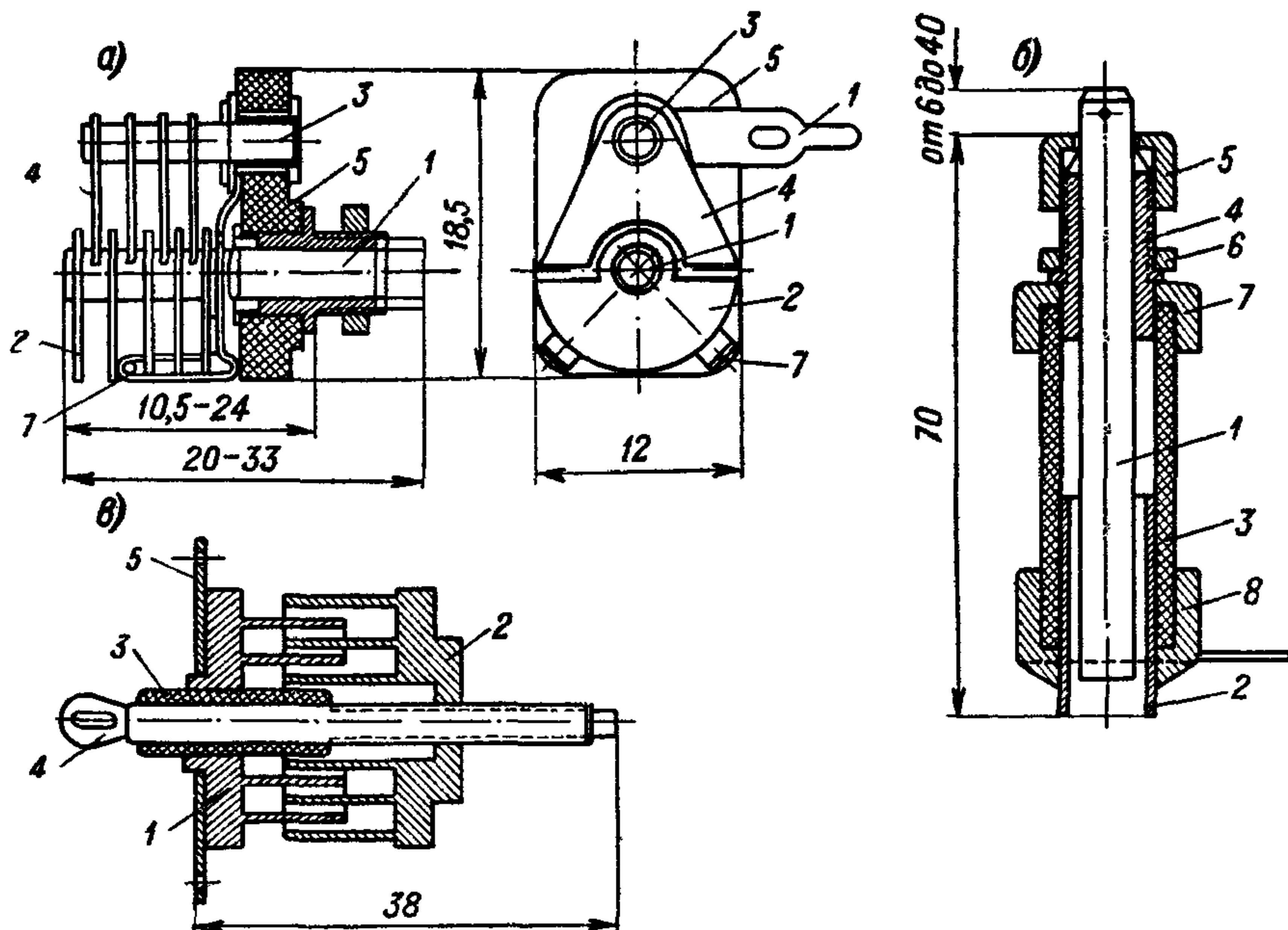


Рис. 318. Воздушные подстроечные конденсаторы: а — плоского типа КПВМ

(1 — ось ротора; 2 — пластина ротора; 3 — стойка статора; 4 — пластина статора; 5 — твердый диэлектрик — керамика; 6 — вывод статора; 7 — вывод ротора);

б — цилиндрического типа малой емкости

(1 — подвижный электрод; 2 — неподвижный электрод; 3 — твердый диэлектрик; 4 — направляющая втулка; 5 — зажимная гайка; 6 — гайка крепления (вывод электрода 1); 7 — соединение втулки с твердым диэлектриком; 8 — соединение электрода 2 с твердым диэлектриком и выводом);

в — цилиндрического типа большой емкости

(1 — неподвижная система электродов; 2 — подвижная система электродов; 3 — твердый диэлектрик; 4 — вывод от системы 2; 5 — крепление и вывод от системы 1).

«бабочка» (рис. 318, б) $C_{\min} = 0,5 \div 1,3 nф$ и $C_{\max} = 1,5 \div 6,5 nф$; для дифференциальных конденсаторов $C_{\min} = 2 \div 3 nф$ и $C_{\max} = 7 \div 26 nф$; допускаемое отклонение от номинала при C_{\max} равно $\pm 1 nф$ (для конденсатора «бабочка» $\pm 0,5 nф$); при использовании латунных пластин $ТКЕ \approx + 60 \cdot 10^6 град^{-1}$; $tg \delta$ для подстроечных конденсаторов обычно меньше $20 \cdot 10^{-4}$ (в нормальных условиях) и $R_{из} > 1000 Mом$; момент вращения 100—300 $Г \cdot см$. Удельная емкость составляет до 3—4,5 $nф/см^3$ (для «бабочки» до 0,6—0,8 $nф/см^3$); пробивное напряжение 850 в при зазоре 0,25 мм и 1500 в — при 0,5 мм (50 гц, действующее значение).

Цилиндрические воздушные подстроечные конденсаторы обычно применяются при меньших значениях емкости, хотя иногда встречаются конструкции с емкостью до 25—50 *пф*. Увеличение емкости достигается вдвиганием металлического стержня в металлическую трубку (рис. 318, б); иногда эта трубка заменяется металлическим слоем, нанесенным на внутреннюю поверхность изоляционной трубки. При больших значениях емкости применяют обкладки в виде двух систем концентрических цилиндров, вдвигаемых одна в другую (рис. 318, в). Для обычных цилиндрических конденсаторов с одной парой обкладок $C_{\text{мин}} = 0,5 \div 1,5$ *пф* и $C_{\text{макс}} = 5 \div 20$ *пф*. По американским данным, для конденсатора со стеклянной серебряной трубкой и латунным сердечником $\text{ТКЕ} = \pm 250 \cdot 10^{-6}$, а сердечником из инвара $\pm 50 \cdot 10^{-6}$ *град*⁻¹; пределы рабочей температуры $-55 \div +125^\circ \text{C}$. При использовании трубки из кварцевого стекла и сердечника из инвара можно снизить ТКЕ практически до нуля, учитывая малые коэффициенты расширения этих двух материалов; при этом $t_{\text{макс}} = 200^\circ \text{C}$. Обычная норма $\text{tg } \delta \approx 1 \div 1,2 \cdot 10^{-4}$ и $R_{\text{из}} \approx 10^3 \div 10^4$ *Мом*. Испытательное напряжение 1000 *в* при 760 *мм рт. ст.* и 500 *в* (пост. ток) при 95 *мм рт. ст.*

Воздушные подстроечные конденсаторы отличаются высокими свойствами и их подключение к контуру для выравнивания начальной емкости обычно не вызывает заметного ухудшения добротности и стабильности контура. Однако они относительно дороги и имеют увеличенный удельный объем, что часто заставляет заменять их подстроечными конденсаторами с твердым диэлектриком, особенно если нужна увеличенная емкость. При этом характеристики подстроечного конденсатора ухудшаются, а потому к такой замене следует подходить с осторожностью.

§ 96. Переменные конденсаторы с твердым диэлектриком

Переменные конденсаторы с твердым диэлектриком в основном используются в качестве подстроечных, хотя в последнее время участились попытки применения некоторых типов таких конденсаторов в качестве конденсаторов переменной емкости в миниатюризованных транзисторных приемниках.

Подстроечные конденсаторы с неорганическим твердым диэлектриком изготавливаются как плоского типа (керамические, слюдяные), так и цилиндрического типа (стеклянные, керамические).

Керамические подстроечные конденсаторы (рис. 319, а) имеют статор из установочной керамики и ротор — из конденсаторной. Изменение емкости достигается вращением ротора, причем изменяется площадь перекрытия обкладок, имеющих форму, близкую к полукругу, и нанесенных на верхней поверхности

ротора и верхней поверхности статора. Таким образом, толщина диэлектрика, разделяющего обкладки, складывается из толщины стенки ротора и воздушного зазора между поверхностями ротора и статора. Для того чтобы снизить этот зазор до минимума, при-

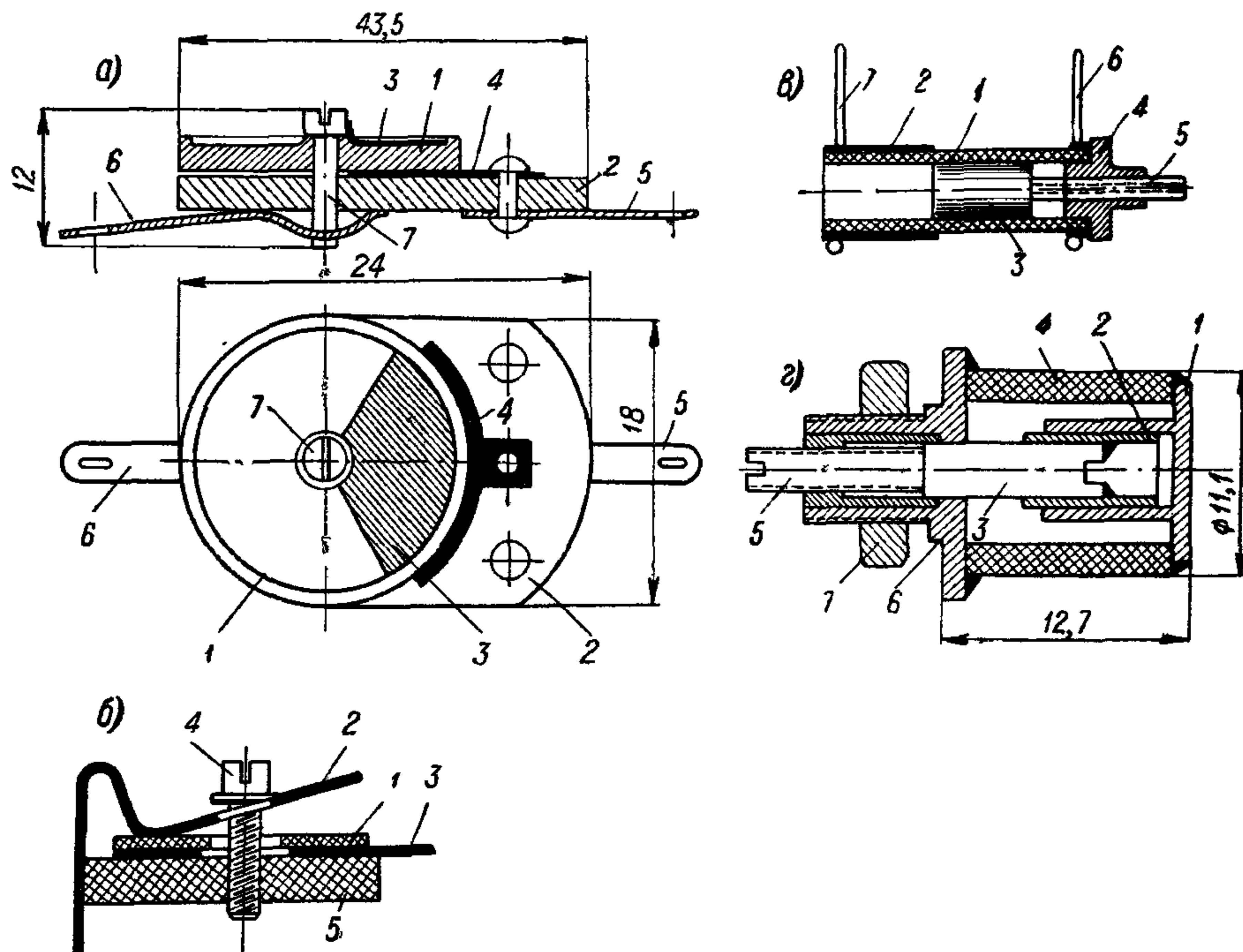


Рис. 319. Подстроечные конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком: а — керамический плоский подстроечный конденсатор

(1 — ротор; 2 — статор; 3 — обкладка на роторе; 4 — обкладка на статоре; 5 — вывод статора; 6 — вывод ротора; 7 — регулировочный винт);

б — воздушнослюдяной подстроечный конденсатор

(1 — слюда; 2 — подвижная обкладка; 3 — неподвижная обкладка; 4 — регулировочный винт; 5 — изоляционное основание);

в — стеклянный подстроечный конденсатор

(1 — стеклянная трубка; 2 — неподвижная обкладка — слой металлизации; 3 — подвижная обкладка — «поршень»; 4 — направляющая втулка; 5 — регулировочный винт; 6 — вывод обкладки; 7 — вывод обкладки 2);

г — керамический цилиндрический подстроечный конденсатор

(1 — направляющая втулка — неподвижный электрод; 2 — керамическая трубка — диэлектрик; 3 — подвижный электрод — стержень, соединенный с диэлектриком; 4 — защитная керамическая трубка; 5 — регулировочный винт; 6 — направляющая втулка винта 5; 7 — гайка крепления к шасси).

меняется оптическая шлифовка этих поверхностей, но все же полностью устранить зазор не удастся. Наличие зазора ухудшает влагостойкость конденсатора и стабильность его емкости во времени, ТКЕ несколько уменьшается, но разброс его увеличивается в сравнении с ТКЕ керамики, из которой изготовлен ротор. Например, если для керамических конденсаторов постоянной

емкости ТКЕ лежит в пределах $-(600 \div 800) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, то для подстроечных с ротором из той же керамики $\text{ТКЕ} = -(200 \div 750) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$. Для керамических подстроечных конденсаторов типа КПК $C_{\text{мин}} = 2 \div 25 \text{ нф}$ и $C_{\text{макс}} = 7 \div 175 \text{ нф}$; момент вращения больше, чем для воздушных конденсаторов, и лежит в пределах (в зависимости от размеров) от 200—1500 до 500—2500 $\text{Г} \cdot \text{см}$. Рабочее напряжение — 500 в пост. тока, или 250 в в. ч.; $U_{\text{ис}} = 1000 \text{ в}$ (пост. ток); $\text{tg } \delta \leq 20 \cdot 10^{-4}$ при 20°С и частоте 1 Мгц; $R_{\text{из}} \geq 1000 \text{ Мом}$ при 20°С и влажности не более 80%; пределы рабочей температуры: $-60 \div +80^\circ \text{С}$.

На принципе конструкции таких конденсаторов производились попытки изготовить керамические конденсаторы переменной емкости; однако оказалось, что при большом числе вращений ротора (характерном для конденсатора переменной емкости в отличие от подстроечного) наблюдается переход части серебряного слоя статора на нижнюю поверхность ротора, что нарушает нормальную работу конденсатора. Разработка керамических конденсаторов переменной емкости продолжается, можно ждать их внедрения в производство в ближайшем будущем.

С л ю д я н ы е п о д с т р о е ч н ы е к о н д е н с а т о р ы (воздушнослюдяные) (рис. 319, б) представляют собой конденсаторы компрессионного типа, в которых развита идея регулировки емкости за счет изменения зазора (рис. 308, б). Применение слюдяной прокладки позволяет максимально сближать обкладки, изготовленные из пружинящего материала (например бронзы), и работать в левой части характеристики $C = f(d)$.

Применяя несколько пар обкладок, разделенных слюдой, можно получать относительно большие емкости (до 2000—3000 нф). Обычно нижний предел для $C_{\text{макс}}$ составлял 100—150 нф, величина $C_{\text{мин}}$ — порядка 0,5 $C_{\text{макс}}$. Конденсаторы имели относительно большую удельную емкость как за счет того, что часть воздушного зазора заменена слюдой ($\epsilon \approx 7$), так и за счет применения малых зазоров, определяемых толщиной слюдяных пластинок. Однако эти конденсаторы имели недостаточно удовлетворительные электрические свойства: стабильность емкости $\pm 1\%$ и $\text{ТКЕ} \approx \approx + (200 \div 400) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, $\text{tg } \delta \approx 10 \div 20 \cdot 10^{-4}$. При увлажнении емкость возрастала на 0,5—1% и выше, $\text{tg } \delta$ возрастал в 2—3 раза, заметно падало сопротивление изоляции. В связи с этим данный тип конденсатора сейчас практически не применяется.

С т е к л я н н ы е конденсаторы изготавливаются цилиндрического типа и обычно имеют неподвижную обкладку, нанесенную на наружную поверхность стеклянной трубки, а подвижную обкладку в виде пружинящего металлического цилиндра (поршня), плотно прилегающего к внутренней поверхности трубки (рис. 319, в). Поэтому такие конденсаторы иногда называют п о р ш н е в ы м и. Аналогичные конденсаторы изготовляют и с заменой стеклянной трубки керамической, что позволяет получить большую емкость за счет повышенной ϵ керамики.

В американском военном стандарте MIL-C-14 409 оговорены такие требования к стеклянным подстроечным конденсаторам поршневого типа: пределы изменения емкости 0,5—30 *пф*, изменение емкости при температурных циклах — не более $\pm 0,04$ *пф*, ТКЕ — не более $\pm 100 \cdot 10^{-6}$ *град*⁻¹, добротность — не менее 500, рабочее напряжение 500 в пост. тока, пределы рабочей температуры: $-55 \div +120^\circ \text{C}$.

Одна из американских фирм сообщает о выпускаемых ею стеклянных подстроечных конденсаторах следующие данные: размеры: $\phi 6,3 \times 10,3$ мм; температурный интервал работы: $-55 \div +125^\circ \text{C}$; пределы изменения емкости: 1—15 *пф*; ТКЕ = $0 \div \pm 50 \cdot 10^{-6}$ *град*⁻¹; рабочее напряжение 500 в пост. тока; $Q \geq 750$ при 1 Мгц; $R_{из} \geq 10^6$ Мом при влажности до 50 %.

В Англии выпускают миниатюрный герметизированный подстроечный керамический конденсатор для военной техники: $C_{мин} = 1,5$ *пф*, $C_{макс} = 12$ *пф*, диаметр 11,1 мм, длина 12,7 мм. Конденсатор состоит из внешнего керамического корпуса, внутрь которого вставлена металлическая направляющая втулка, образующая первую обкладку. Керамический диэлектрик имеет вид маленькой трубки, припаянной к концу регулировочного стержня с нарезкой. Часть стержня, входящая внутрь керамической трубки, служит второй обкладкой. При вращении регулировочного винта стержень вместе с припаянной к нему керамической трубкой входит в отверстие втулки (первой обкладки), что дает практически линейное изменение емкости с числом оборотов винта. Внутрь конденсатора введена полисиликсановая смазка. Изготавливаются также более простые цилиндрические триммеры, представляющие собой длинный металлический винт, перемещающийся внутри керамической трубки, наружная поверхность которой посеребрена на половину ее длины. Изменение емкости примерно линейное в пределах от 0,5 до 3 *пф* и от 1,5 до 10 *пф*.

Переменные конденсаторы с органическим твердым диэлектриком. Уже давно производились попытки уменьшить габаритные размеры или увеличить предельную емкость воздушных конденсаторов переменной емкости, помещая между пластинами конденсаторов обычного типа прокладки из тонких листовых материалов типа эбонита или целлулоида. При этом резко ухудшался угол потерь (падала добротность), что препятствовало сколь-нибудь широкому применению таких конденсаторов, не говоря уже об ухудшении их ТКЕ и стабильности емкости. Появление таких пленочных неполярных диэлектриков, как полистирол, полиэтилен и тетрафторэтилен с весьма малым углом потерь и относительно невысоким значением ТКЕ (если не считать полиэтилена), позволяющих резко снизить толщины прокладок и, соответственно, изготавливать конденсаторы с большей удельной емкостью, снова привлекло внимание к вопросу создания малогабаритного конденсатора переменной емкости

с пленочным или, точнее, с пленочновоздушным диэлектриком. Как уже отмечалось выше, такие конденсаторы представляют особый интерес для миниатюрных транзисторных приемников. В качестве примера укажем некоторые данные конденсатора такого типа, разработанного фирмой «Тесла» (ЧССР). Внешний вид и характеристики этого конденсатора показаны на рис. 320, а. Конденсатор состоит из двух одинаковых секций: $C_{\min} = 9 \text{ пф}$, $C_{\max} = 380 \text{ пф}$, что дает суммарную максимальную емкость 760 пф . Размеры конденсатора $25 \times 25 \times 16,6 \text{ мм}$ и объем около 10 см^3 ; это соответствует удельной емкости порядка 75 пф/см^3 .

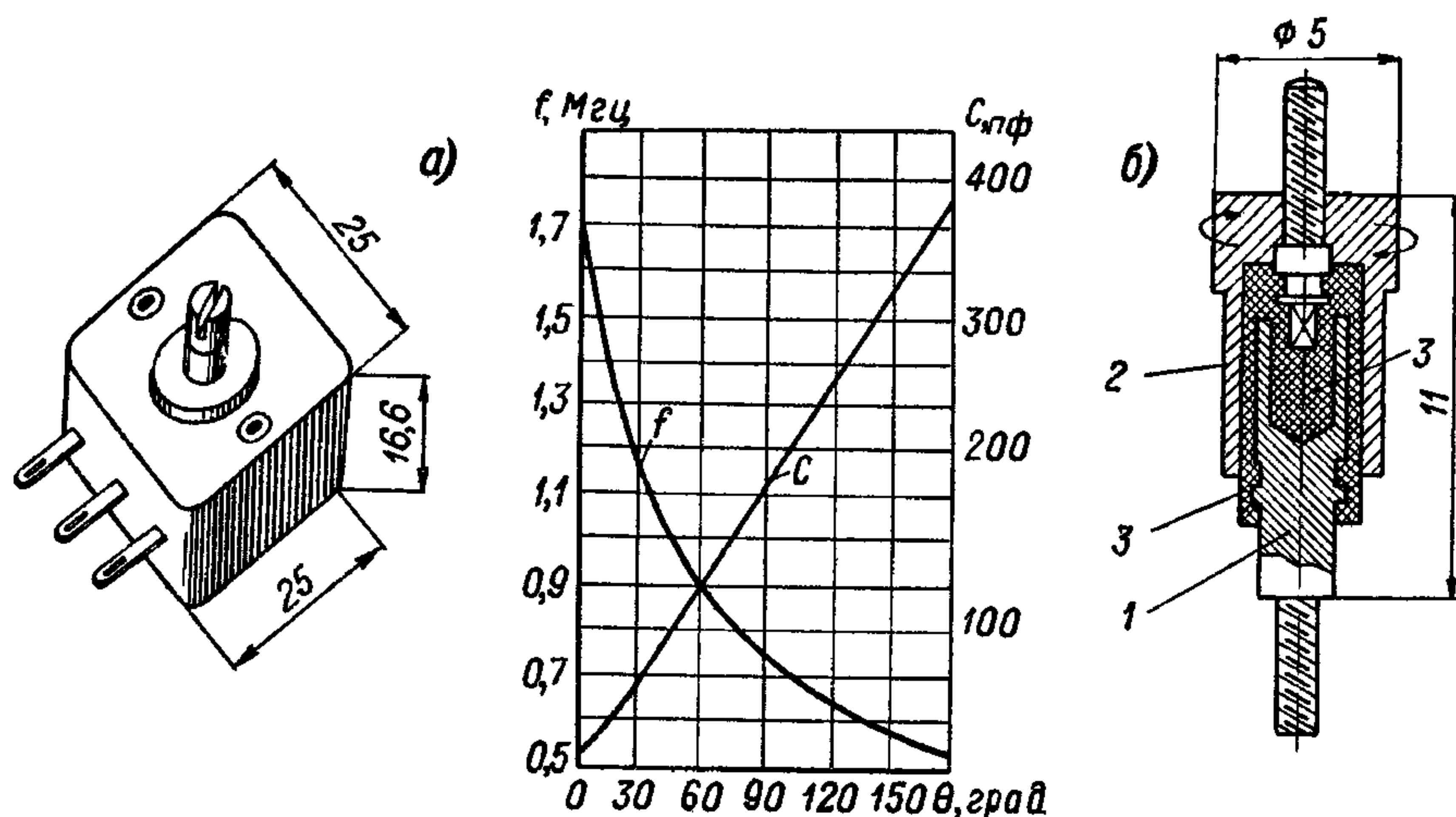


Рис. 320. Переменные конденсаторы с твердым органическим диэлектриком: а — плоский многопластинчатый конденсатор переменной емкости фирмы «Тесла» и зависимость его емкости (и частоты контура) от угла поворота; б — цилиндрический подстроечный конденсатор

(1 — неподвижная обкладка; 2 — подвижная обкладка; 3 — твердый диэлектрик — полиэтилен).

Такое увеличение $\epsilon_{\text{уд}}$ по сравнению с воздушными конденсаторами, которые при зазоре $0,25 \text{ мм}$ имеют около $5\text{--}6 \text{ пф/см}^3$, объясняется не столько заменой основной части воздуха в зазоре синтетической пленкой (так как для нее ϵ лишь порядка $2\text{--}2,5$), сколько возможностью при наличии тонкой пленки и небольшого рабочего напряжения сильно сблизить обкладки конденсатора, не опасаясь их короткого замыкания. Конденсатор «Тесла» рассчитан на испытательное напряжение 100 в пост. тока, добротность его выше 300 при 1 Мгц ($\text{tg } \delta$ ниже $33 \cdot 10^{-4}$) и сопротивление изоляции не ниже 100 Мом , ТКЕ и стабильность емкости не нормируются. Конденсаторы аналогичного типа изготавливаются также с двумя меньшими емкостями 180 и 150 пф .

Подстроечные конденсаторы с пластмассовым диэлектриком выпускаются рядом зару-

бежных фирм. Основой их конструкции служит металлический стержень, который с помощью регулировочного винта перемещается внутри металлической трубки, будучи отделен от ее внутренней поверхности тонкой пластмассовой трубкой из какой-либо неполярной пластмассы, чаще всего из политетрафторэтилена, но иногда и из полиэтилена. Обычное применение этих конденсаторов — нейтрализация в промежуточных усилителях частоты; поэтому их $C_{\text{макс}}$ должна быть порядка нескольких пикофарад и $C_{\text{мин}}$ должна быть возможно малой. Обычные пределы изменения емкости: 0,5—3,5 пф. Изменение емкости достигается скольжением наружной трубчатой обкладки относительно неподвижной внутренней по винтовой нарезке. Для получения достаточной емкости,

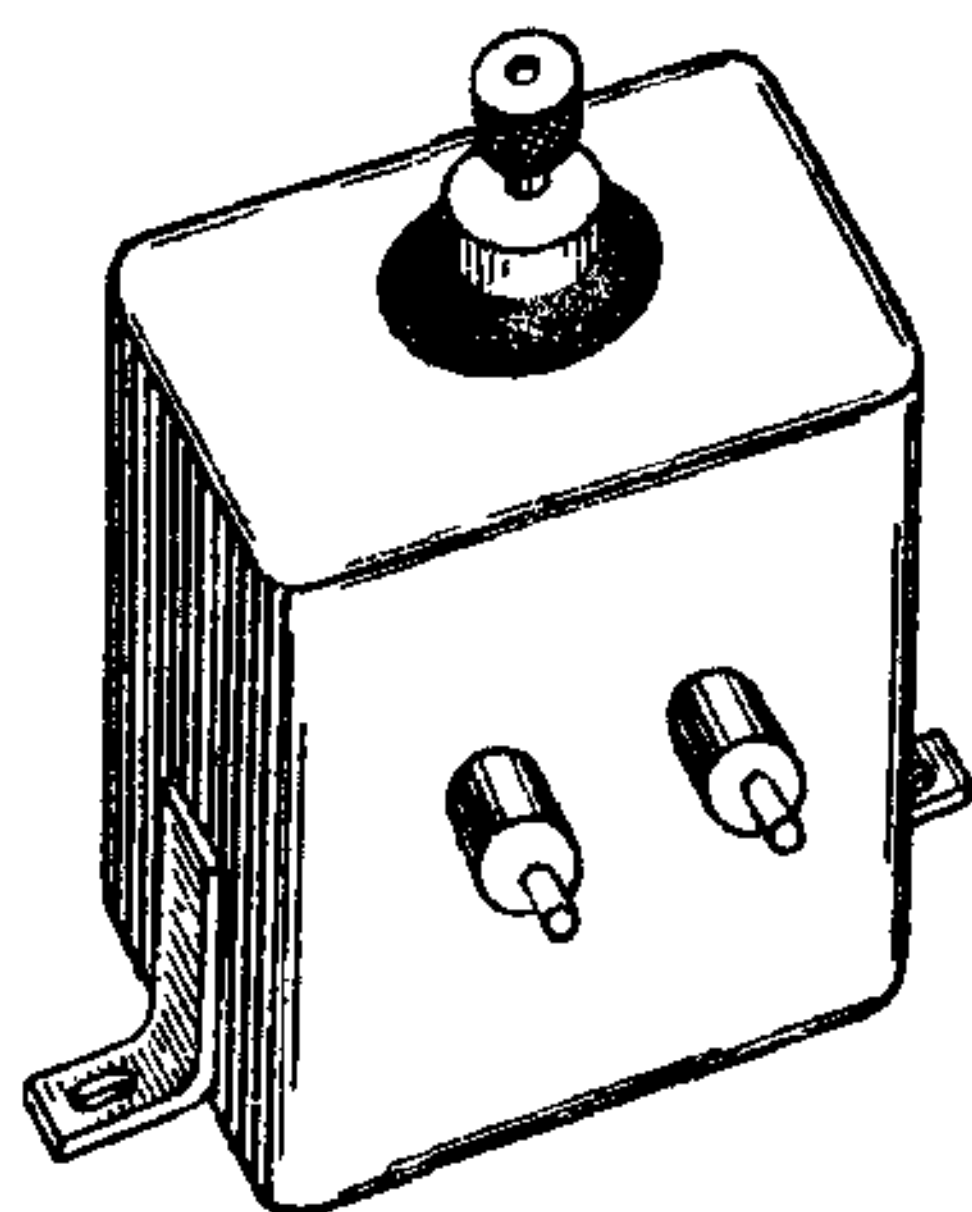


Рис. 321. Полистирольный конденсатор с подстройкой емкости.

учитывая малую ϵ пластмассы, приходится брать малую толщину диэлектрика, порядка 0,25 мм; преимуществом пластмассы с малой ϵ в сравнении с керамикой является меньшее влияние воздушного зазора на емкость конденсатора. При использовании полиэтилена $\text{tg } \delta$ подобного конденсатора не выше $15 \cdot 10^{-4}$. Одним из вариантов подобных конденсаторов является устройство, в котором подвижный электрод имеет нарезку на своей поверхности, которая соответствует нарезке на внутренней поверхности наружного электрода; в углубления резьбы входит пластмассовая пленка, отделяющая одну обкладку от другой.

К числу переменных конденсаторов с твердым органическим диэлектриком можно также отнести полистирольные подстроечные конденсаторы большой емкости (рис. 321). Эти конденсаторы позволяют провести небольшую подстройку их емкости уже после сборки в аппаратуре. В них используются секции с выступающей фольгой специальной намотки, обеспечивающей большую стабильность емкости в отсутствие внешнего давления. Изменяя давление на секцию с помощью нажимного винта, головка которого видна на крышке конденсатора на рис. 321, можно изменять емкость конденсатора в пределах $\pm 1 \div 1,5\%$, до $\pm 0,25\%$ она меняется линейно с углом поворота винта. Стабильность установленного значения емкости во времени, по рекламным данным, составляет 0,03%. Точность подгонки емкости к номинальному значению указывалась ранее равной $\pm 0,1\%$, но с 1961 г. в рекламе приводится значение $\pm 0,01\%$. Одна из американских фирм указывает номинальные данные: напряжение 200 в и емкость 0,01—1 мкф, другая — 100—400 в и 1—10 мкф. Выпуск аналогичных конденсаторов с регулировкой емкости в пределах $\pm 10\%$ начат также в Англии.

§ 97. Переменные конденсаторы высокого напряжения

Выше уже отмечалось, что при повышении рабочего напряжения воздушные конденсаторы резко увеличивают свой объем в связи с тем, что благодаря низкой электрической прочности воздуха приходится увеличивать зазор между пластинами; удельный объем конденсатора изменяется прямо пропорционально квадрату зазора (§ 51). Тем не менее при напряжениях порядка нескольких киловольт воздушные конденсаторы еще находят себе применение в радиопередающих устройствах. В них используются алюминиевые или бронзовые полированные пластины с тщательно закругленными краями и керамика в качестве твердого диэлектрика. По данным Дэммера¹, прямоемкостные конденсаторы такого типа изготовляют с $C_{\text{макс}}$ до 1000 пф и квадратичные — до 500 пф. Точность настройки 0,1%, $\text{ТКЕ} = 100 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, контактное сопротивление 5—15 мом, сопротивление изоляции — не ниже 1000 Мом. Зависимость между зазором в конденсаторе и его рабочим напряжением при частоте 20 Мгц показана на рис. 322, а. Значение $E_{\text{раб}}$ составляет 0,6—0,7 кв/мм. При использовании подобных конденсаторов в авиационном оборудовании надо также учитывать снижение пробивного напряжения воздуха с увеличением высоты над уровнем моря (рис. 322, б).

Как известно, для получения газообразного диэлектрика с повышенной электрической прочностью можно использовать два пути: или применить сжатый газ, или, наоборот, резко снизить давление газа, т. е. применить достаточно высокий вакуум (см. рис. 69).

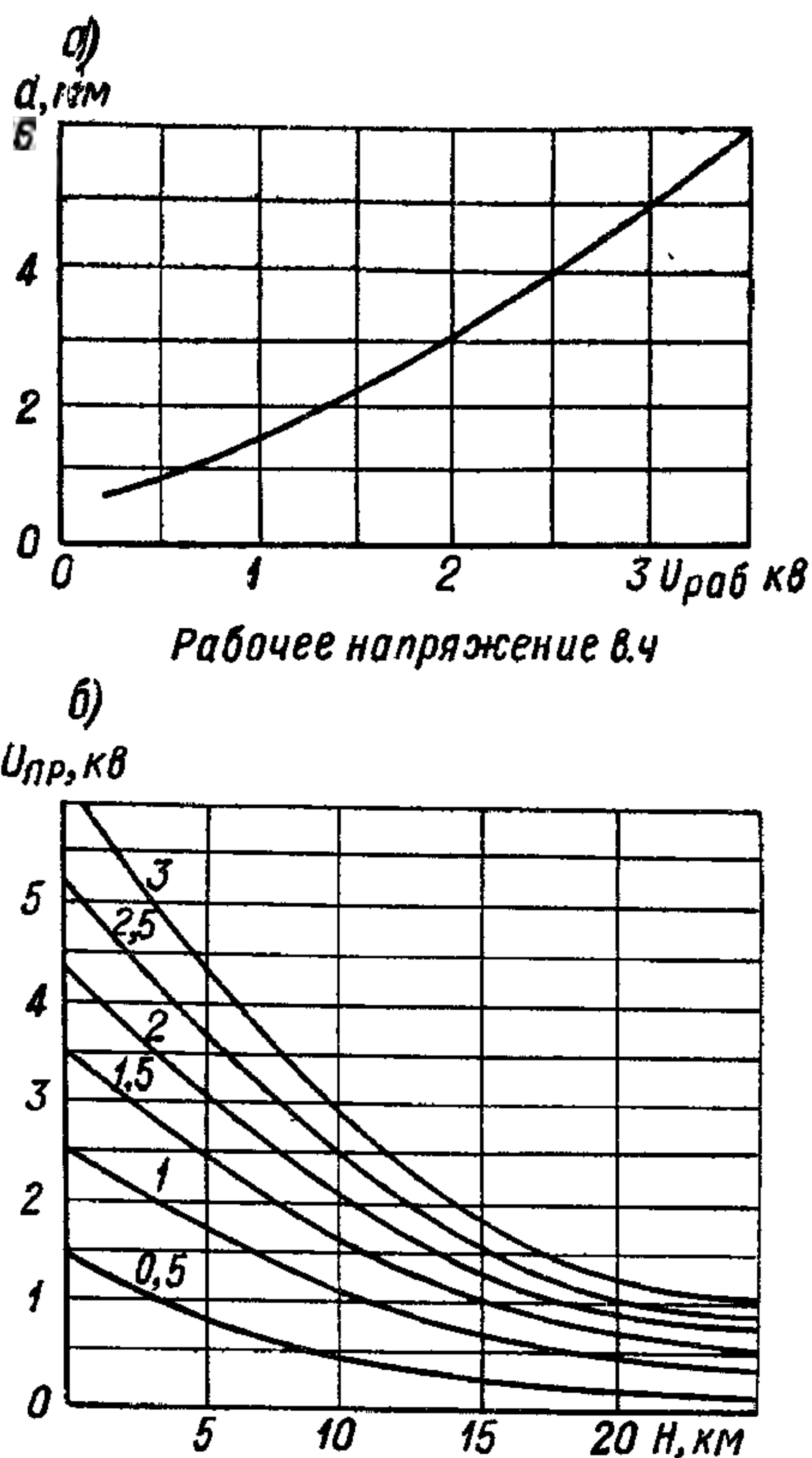


Рис. 322. Зависимость зазора в воздушном конденсаторе от рабочего напряжения высокой частоты (а) и зависимость пробивного напряжения конденсатора от высоты над уровнем моря (б) при различных зазорах (цифры у кривых указывают величину зазора в мм).

¹ C. W. A. Dummer. Variable capacitors and trimmers. London, 1957.

Для получения газонаполненных конденсаторов переменной емкости можно использовать конструкцию конденсатора с плоскими пластинами, показанную на рис. 153, а, применив уплотняющие сальники, позволяющие поворачивать центральный стержень с минимальной утечкой газа, и заменив круглые пластины, установленные на этом стержне в конденсаторах постоянной емкости, полукруглыми или другой формы, нужной для заданного закона изменения емкости. Переменные конденсаторы такого типа были разработаны

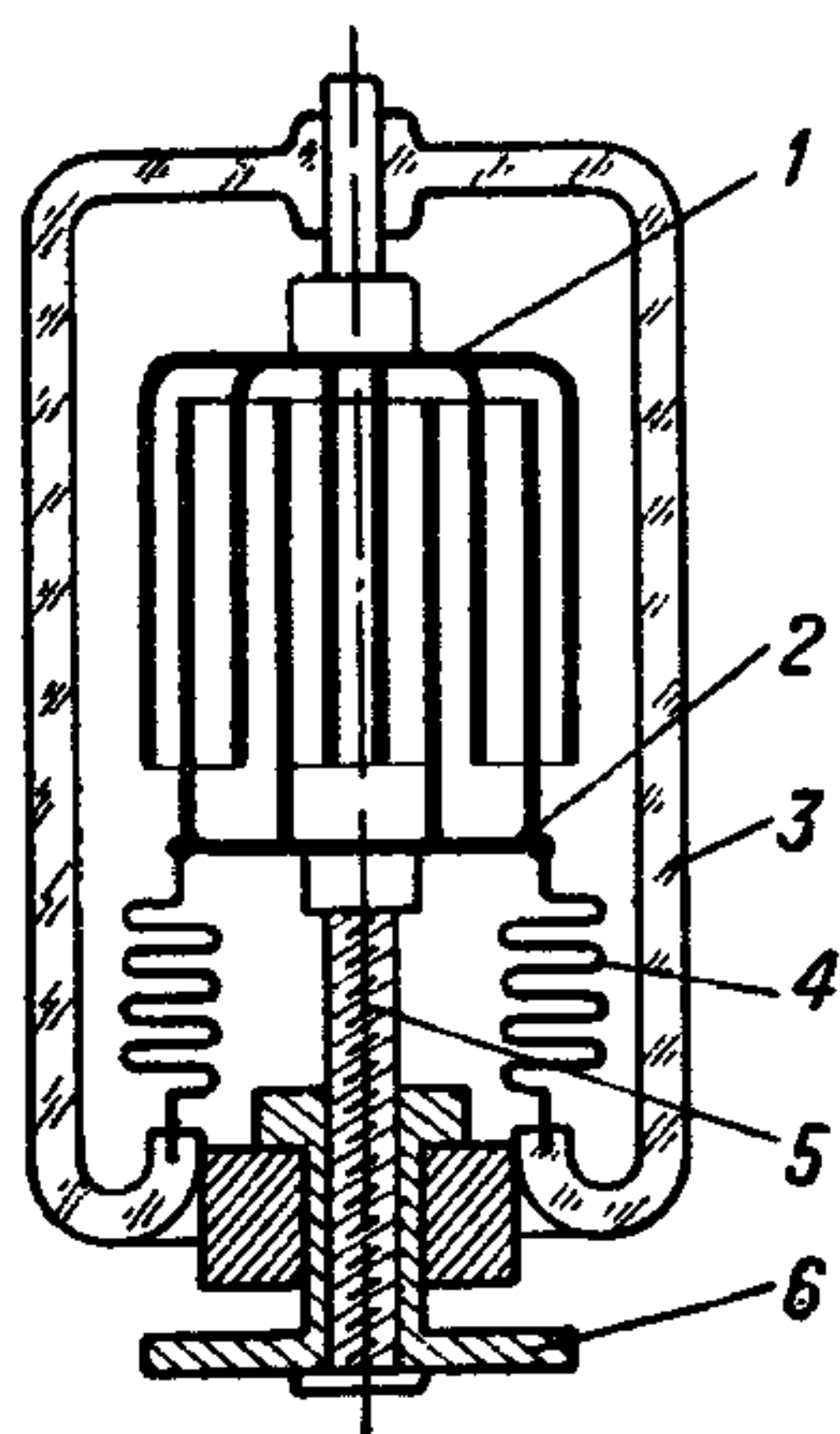


Рис. 323. Схема устройства вакуумного конденсатора переменной емкости.

1 — неподвижная система обкладок; 2 — подвижная система обкладок; 3 — стеклянная оболочка; 4 — сильфон; 5 — регулировочный винт; 6 — гайка, вращение которой обеспечивает поступательное движение винта 5.

и исследованы в СССР Б. М. Гохбергом и Н. М. Рейновым¹ и находили себе известное применение в мощных радиоустройствах в виде индивидуально изготовляемых изделий. В США и до сих пор отдельные фирмы, например Лап Инсулэйтор, продолжают изготавливать подобные конденсаторы с большими значениями реактивной мощности при частотах порядка мегагерц.

Все же в настоящее время наибольшее применение находят вакуумные переменные конденсаторы. Разработка таких конденсаторов встретила известные трудности, так как система сальников, использованная для ввода подвижной оси в газонаполненный конденсатор, уже не годилась в вакуумном конденсаторе, где требовалось поддерживать малое остаточное давление порядка 10^{-5} мм рт. ст., для чего нужна полная герметизация конструкции. Поэтому сначала пользовались набором вакуумных конденсаторов небольшой постоянной емкости и меняли емкость ступенями, включая параллельно различное количество секций такого набора с помощью специального переключателя. Далее был найден способ непосредственного плавного изменения емкости вакуумных конденсаторов с применением металлических сильфонов, герметично впаянных в стеклянную колбу вакуумного конденсатора (рис. 323). При вращении регулировочного винта система подвижных цилиндров входит в зазоры между неподвижными цилиндрическими электродами за счет растягивания сильфона; при этом емкость конденсатора возрастает, а малое остаточное давление в пространстве между электродами сохраняется. Внешний вид английского вакуумного конденсатора переменной емкости со стеклянной оболочкой показан на рис. 324. Рядом с ним показана конструкция вакуумного конденсатора

¹ Б. М. Гохберг, Н. М. Рейнов. — ЖТФ, 1945, XV, № 10, с. 713.
Б. М. Гохберг, Н. М. Рейнов. — ДАН СССР, 1950, XX, № 6, с. 1005.

в керамической оболочке по американскому патенту 1965 г., в котором предусмотрен электродвигатель для перемещения подвижной системы цилиндров.

Отечественные переменные вакуумные конденсаторы типа КП1 изготавливаются с широким диапазоном номинальных данных: пределы изменения емкости — от 3—50 до 20—1000 *пф*, рабочее напряжение (амплитудное значение) — от 5 до 45 *кв*, допустимый

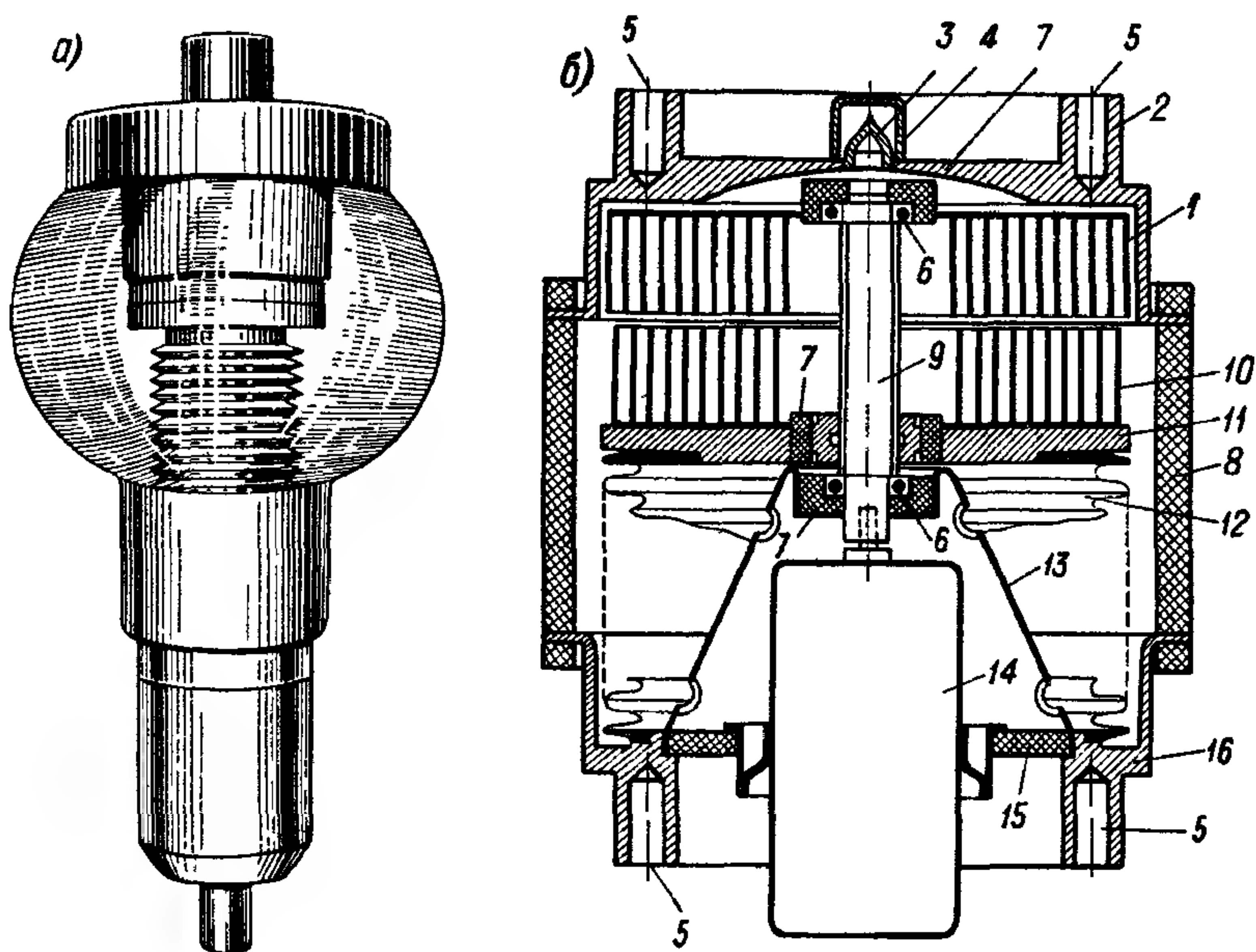


Рис. 324. Вакуумные конденсаторы переменной емкости: *а* — английский конденсатор со стеклянной оболочкой; *б* — американский конденсатор с керамической оболочкой и приводом от электродвигателя

(1 — неподвижная система электродов; 2 — верхняя торцовая крышка; 3 — трубка для откачки; 4 — защитный колпачок; 5 — отверстия для болтов крепления конденсатора; 6 — шариковый подшипник; 7 — керамический изолятор; 8 — керамическая оболочка; 9 — центральная ось; 10 — подвижная система электродов; 11 — диск крепления подвижной системы; 12 — сильфон; 13 — поддерживающий конус; 14 — электродвигатель; 15 — керамический диск; 16 — нижняя торцовая крышка).

ток (эффективное значение при температуре окружающей среды не выше 70° С) — от 7,5 до 125 *а*, максимальная частота — от 3,2 до 60 *Мгц*. Вес конденсаторов в зависимости от номинальных данных составляет от 0,8 до 10,6 *кг*, диаметр — от 68 до 230 *мм* и высота — от 125 до 522 *мм*. Характеристики этих конденсаторов близки к характеристикам вакуумных конденсаторов постоянной емкости, описанных в § 60. Там было также отмечено, что для вакуумных конденсаторов постоянной емкости стоит задача замены стеклянных корпусов на керамические. Эта же задача является актуальной и для конденсаторов переменной емкости. Подобный конденсатор в керамическом корпусе описан в статье

Монтгайара и характерен своим относительно небольшим напряжением: 3 кВ (амплитуда), пределы изменения емкости: от 8 до 250 пФ, рабочий ток — до 30 А (эфф). При $C_{\text{макс}}$ резонансная частота равна 55 МГц, номинальное рабочее напряжение сохраняется до высоты 18 км (давление 55 мм рт. ст.). Потери в конденсаторе невелики, но возрастают с частотой: $\text{tg } \delta = 0,5 \cdot 10^{-4}$ при частоте 1 МГц и $13 \cdot 10^{-4}$ при 10 МГц (20° С). Конденсатор может работать при температуре до +200° С. В нем использовано остаточное давление ниже $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., сильфон — медный, керамика — алюминоксид. Размеры конденсатора: диаметр 66 мм и высота 110 мм, вес — 410 г. Аналогичный воздушный конденсатор имеет размеры 210×220×180 мм и вес 1800 г, если давление составляет 760 мм рт. ст. При снижении давления до 55 мм рт. ст. размеры воздушного конденсатора резко возрастают. Отношение k_V объема воздушного конденсатора к объему вакуумного конденсатора с теми же номинальными данными при различных значениях номинального напряжения и при двух значениях давления окружающей среды характеризуется такими цифрами:

Напряжение, кВ	0,35	0,5	5	50
k_V при 760 мм рт. ст.	1	32	122	137
То же, » 55 » » »	1	6000	25 000	25 000

Выше отмечалось, что воздушные конденсаторы еще находят себе применение при напряжениях нескольких киловольт (до 3 кВ); по мнению Монтгайара, вакуумные конденсаторы имеет смысл применять вместо воздушных уже начиная с напряжений выше 500 В. Пробивное напряжение между обкладками вакуумного конденсатора, очевидно, не зависит от высоты над уровнем моря, т. е. от давления среды, окружающей конденсатор. Однако при повышении высоты возникает опасность перекрытия между выводами конденсатора по наружной поверхности его стеклянной оболочки; это приходится учитывать при проектировании конденсатора, выбирая разрядное расстояние по поверхности оболочки в соответствии с номинальным напряжением конденсатора и минимальным давлением окружающей среды, на которое он должен быть рассчитан.

Дэммер упоминает в своей книге о возможности применения переменных конденсаторов с жидким диэлектриком, полученных путем помещения воздушного переменного конденсатора в герметизированный корпус, заполняемый жидкостью. В качестве недостатков таких конденсаторов он отмечает некоторую сложность уплотнения оси ротора в крышке конденсатора и необходимость использования той или иной системы компенсации изменения объема жидкости при нагревании конденсатора. Однако он не

отмечает важного недостатка таких конденсаторов — резко увеличенного ТКЕ, о чем мы уже говорили, рассматривая конденсаторы постоянной емкости с жидким диэлектриком (§ 61). Повидимому, это является главным препятствием для применения конденсаторов с жидким диэлектриком в стабильных контурах. Можно полагать, что и за рубежом конденсаторы такого типа не изготавливаются в производственном масштабе, хотя, возможно, имеются отдельные примеры использования подобных конденсаторов индивидуального изготовления в тех случаях, когда высокая стабильность частоты контура при колебаниях температуры не требуется.

Г л а в а XV

КОНДЕНСАТОРЫ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМОЙ ЕМКОСТЬЮ

§ 98. Общая характеристика

Еще сравнительно недавно были известны только механические способы изменения емкости, которые мы рассмотрели в предыдущей главе. Они позволяли осуществлять плавное изменение емкости в относительно широких пределах, причем использование газообразного диэлектрика позволило иметь переменные конденсаторы с высокой добротностью (малым $\operatorname{tg} \delta$) и большой стабильностью установленного значения емкости как во времени, так и при колебаниях температуры. Вместе с тем переменные конденсаторы с газообразным диэлектриком даже при небольших напряжениях имеют относительно большие размеры и вес, что затрудняет в сильной степени их использование в миниатюризованной аппаратуре; неудобством является также относительно большое время, необходимое для установки нужного значения емкости, поскольку эта установка связана с механическим перемещением подвижной части конденсатора. Дистанционное управление емкостью таких переменных конденсаторов в принципе возможно, но связано с известными осложнениями и, в частности, с применением для этой цели миниатюрных электродвигателей. Поэтому была бы очень желательна разработка таких конденсаторов, по возможности с малыми размерами, емкостью которых можно было бы управлять электрически, что решило бы как проблему ускорения установки нужного значения емкости, так и проблему дистанционного управления.

Теперь появились две возможности в этом направлении: а) использование керамических диэлектриков со спонтанной поляризацией (сегнетоэлектриков) — переменные конденсаторы этого типа известны у нас под названием в а р и к о н д; б) использование запорных слоев в полупроводниках на границе областей с различным характером проводимости: электронной и дырочной;

переменные конденсаторы такого типа называют **варикап**, **семикап** и т. п.

В дальнейшем изложении мы будем называть два этих типа конденсаторов сегнетоэлектрическими и полупроводниковыми. Для изменения емкости сегнетоэлектрических конденсаторов используется характерная для спонтанной поляризации зависимость ϵ от напряженности электрического поля (см. рис. 7, и), из которой следует, что емкость конденсатора с таким диэлектриком должна зависеть от напряжения по такому же закону. В данном случае в зависимости от используемого диапазона переменного напряжения мы можем иметь как увеличение емкости конденсатора с увеличением напряжения, так и уменьшение ее при увеличении напряжения. Добавочные возможности управления величиной емкости получаются при наложении постоянной составляющей напряжения на переменное напряжение, воздействующее на конденсатор.

Для изменения емкости полупроводниковых конденсаторов используется зависимость толщины запирающего слоя, применяемого в качестве диэлектрика, от напряжения. При увеличении напряжения, приложенного к запирающему слою в запирающем направлении, толщина этого слоя увеличивается и емкость конденсатора снижается. Таким образом, в данном случае при увеличении напряжения мы можем получить только снижение емкости.

Известно, что при спонтанной поляризации величина ϵ может достигать огромных значений, порядка 1000—10 000 и даже выше. Поэтому для сегнетоэлектрических конденсаторов можно получать большие значения емкости при малых размерах конденсаторов и иметь высокий верхний предел $C_{\text{макс}}$. Величина ϵ для обычно применяемых полупроводников — кремния и германия невелика, порядка 11—15, поэтому верхний предел $C_{\text{макс}}$ у полупроводниковых конденсаторов резко снижен по сравнению с сегнетоэлектрическими; обычно он не превышает десятков пикофарад, реже достигает нескольких сотен. При увеличении размеров конденсаторов этого типа можно получить и более высокие значения емкости.

Вместе с тем сегнетоэлектрические конденсаторы обладают такими недостатками, которые обычно не позволяют даже ставить вопрос о замене ими переменных воздушных конденсаторов. Это, с одной стороны, сильная зависимость ϵ от температуры, характерная для материалов со спонтанной поляризацией, при которой величина ϵ проходит через резко выраженный максимум при температуре, называемой точкой Кюри (рис. 7, з), с другой стороны, это недостаточная стабильность величины ϵ во времени, также характерная для данного типа поляризации, особенно при температурах, близких к точке Кюри. Нестабильность ϵ , очевидно, приводит к соответствующей нестабильности емкости, недопустимой в большинстве контуров, для настройки которых применяют воздушные конденсаторы. Кроме того, большие потери в сегнето-

керамических материалах, также присущие спонтанной поляризации, дают резкое снижение добротности Q контура, в который включается сегнетоэлектрический конденсатор. В этом случае обычное значение $Q \approx 20 \div 25$, но при повышении напряжения, приложенного к конденсатору, оно может падать до 10 и даже ниже.

Вместе с тем сегнетоэлектрические конденсаторы уже нашли себе широкое применение в технике для самых разнообразных целей: в диэлектрических усилителях, умножителях частоты, стабилизаторах напряжения и т. д. При использовании термостатирования в некоторых случаях их можно применять и для настройки контуров, когда не требуется высокая добротность.

Полупроводниковые конденсаторы, уступаая сегнетоэлектрическим по величине номинальной емкости, имеют улучшенную стабильность емкости (при заданном значении напряжения) как во времени, так и с температурой. Добротность этих конденсаторов также повышена и в определенной области частот может даже превышать 1000, составляя не ниже 25—50 при частотах порядка десятков мегагерц. Хотя по величине добротности и стабильности емкости эти конденсаторы уступают воздушным, но зато они имеют резко сниженные размеры и вес, а также повышенную надежность, что уже реально позволяет ставить вопрос об их применении для замены переменных воздушных конденсаторов в некоторых случаях использования последних в малогабаритной аппаратуре.

Наряду с этим полупроводниковые конденсаторы могут применяться и во многих других случаях, где требуется емкость, зависящая от напряжения, конкурируя с сегнетокерамическими конденсаторами особенно успешно при небольших значениях емкости и в тех случаях, когда к ее стабильности предъявляются повышенные требования, а также когда нужны пониженные потери.

§ 99. Сегнетоэлектрические конденсаторы

Материалы со спонтанной поляризацией широко применяются теперь при изготовлении низкочастотных керамических конденсаторов с большой емкостью (§ 68). В этом случае при составлении рецептуры материала принимаются меры к тому, чтобы максимально ослабить температурную зависимость ϵ и ее изменения при колебаниях напряжения хотя бы за счет снижения максимальных значений $\epsilon_{\text{макс}}$. В таких материалах изменение ϵ при изменении напряженности поля от 0 до 0,5 кВ/мм не превосходит $\pm 10 \div 30\%$.

При использовании сегнетокерамики для изготовления специальных нелинейных сегнетоэлектрических конденсаторов в состав керамической массы вводятся примеси, которые должны наоборот уже не ослаблять, а усиливать зависимость ϵ от напряжения,

увеличивая нелинейность конденсатора. При этом усиливается зависимость ϵ от температуры и возрастает значение $\epsilon_{\text{макс}}$ (рис. 325).

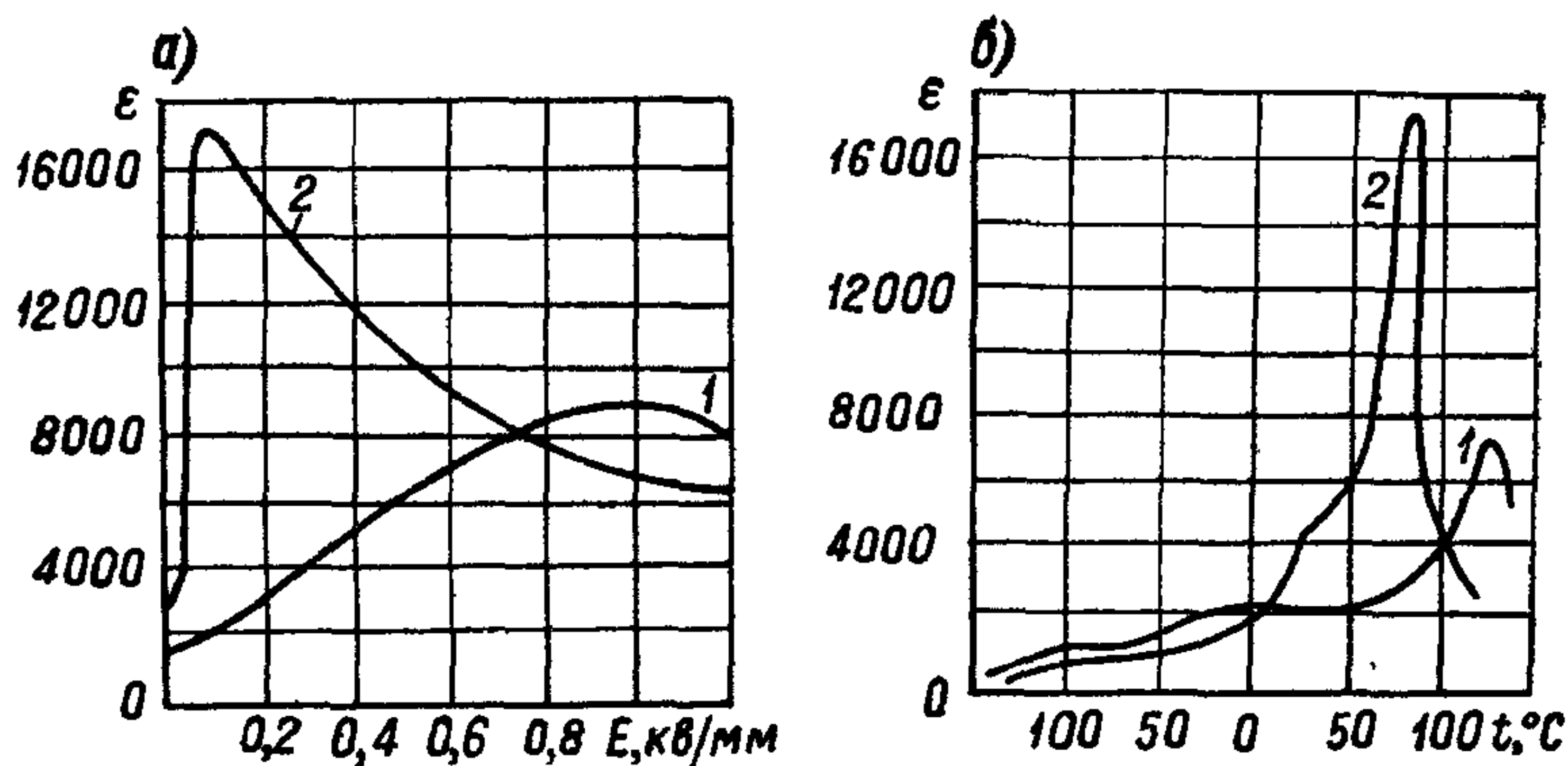


Рис. 325. Зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности поля (а) и от температуры (б).

1 — первый керамический материал со спонтанной поляризацией — титанат бария; 2 — специальный сегнетоэлектрический материал ВК-1 для нелинейных конденсаторов.

Для использования в нелинейных конденсаторах был изготовлен специальный керамический материал с резко выраженной спонтанной поляризацией и точкой Кюри около 80°C , получивший

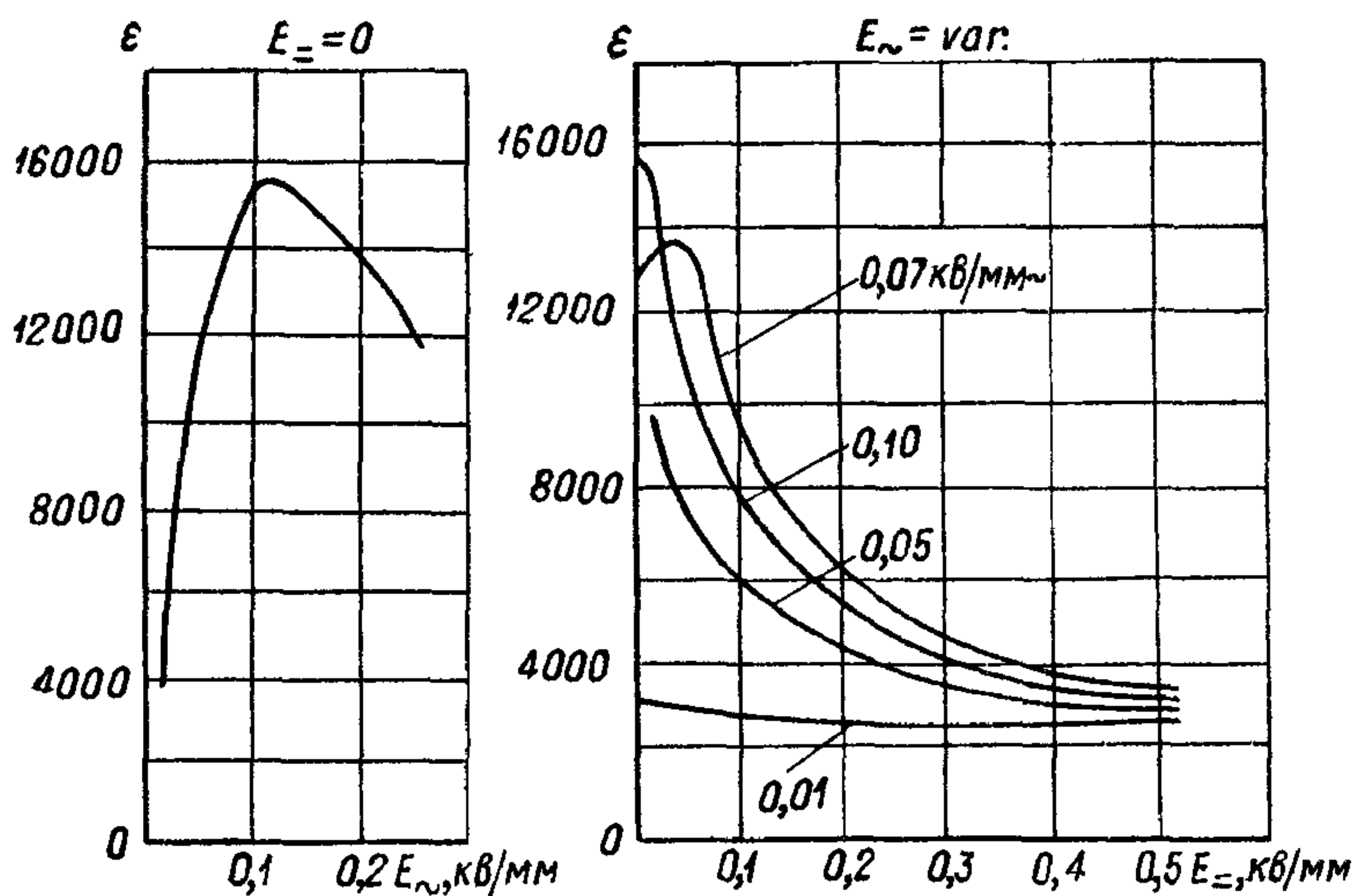


Рис. 326. Зависимость ϵ материала ВК-1 от напряженности поля.

название ВК-1¹. Зависимость диэлектрической проницаемости этого материала от напряженности поля при частоте 50 гц при отсутствии постоянного поля и от напряженности постоянного

¹ В последнее время получены новые, улучшенные материалы этого типа ВК-2, ВК-3, ВК-4.

поля при различных значениях напряженности переменного поля показана на рис. 326. В области слабых полей величина ϵ у материала ВК-1 резко изменяется с температурой: от 2000 при 20°C до 16 000 при температуре точки Кюри, но при более высоких значениях $E \approx 0,2 \text{ кВ/мм}$ температурная зависимость ϵ заметно ослабляется (рис. 327). Все же и в таких условиях эта зависимость далека от линейности, и ϵ заметно снижается в области температур ниже нуля, а при температурах выше точки Кюри быстро падает в связи с исчезновением спонтанной поляризации при высоких температурах. Потери у ма-

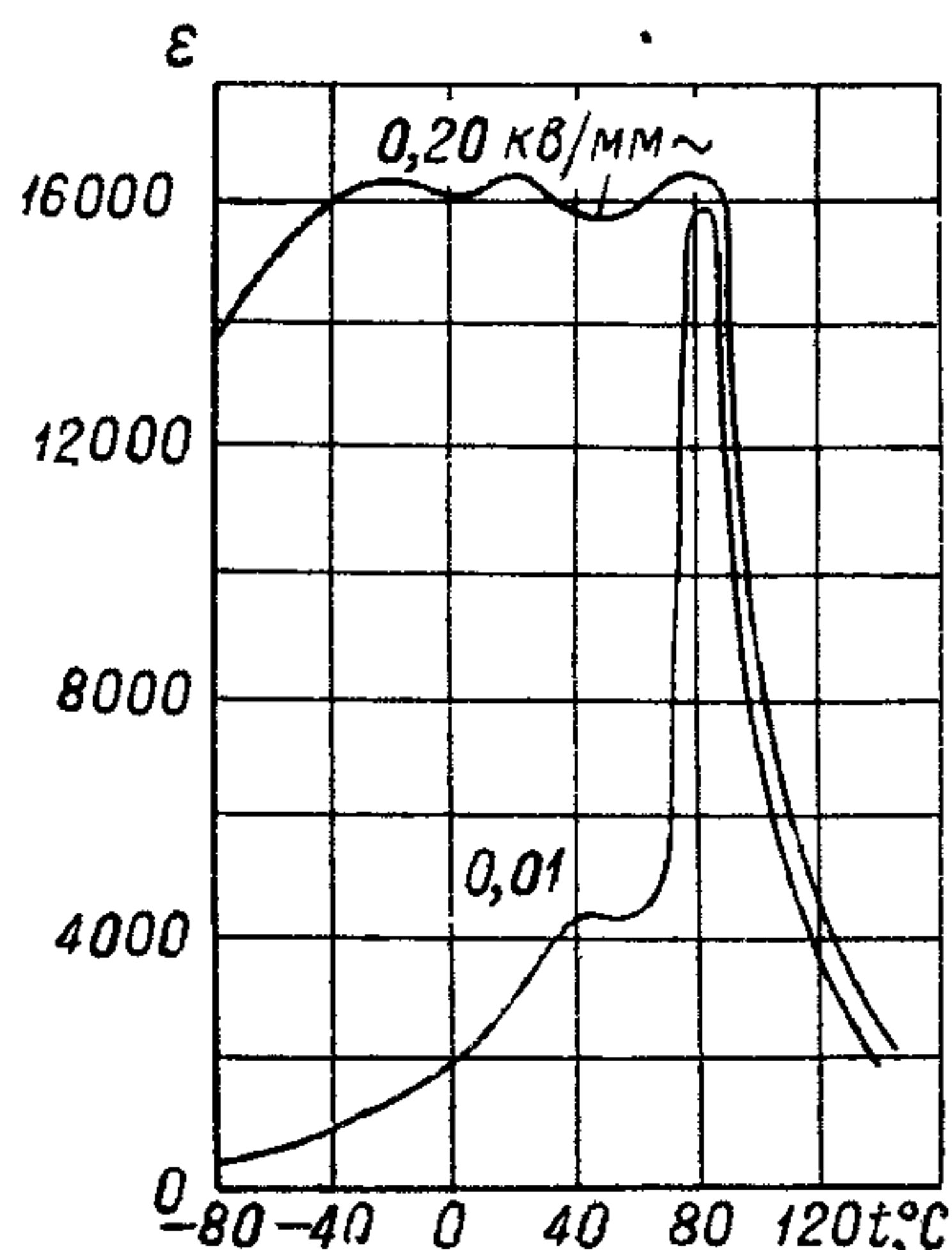


Рис. 327. Зависимость ϵ материала ВК-1 от температуры при двух значениях напряженности поля.

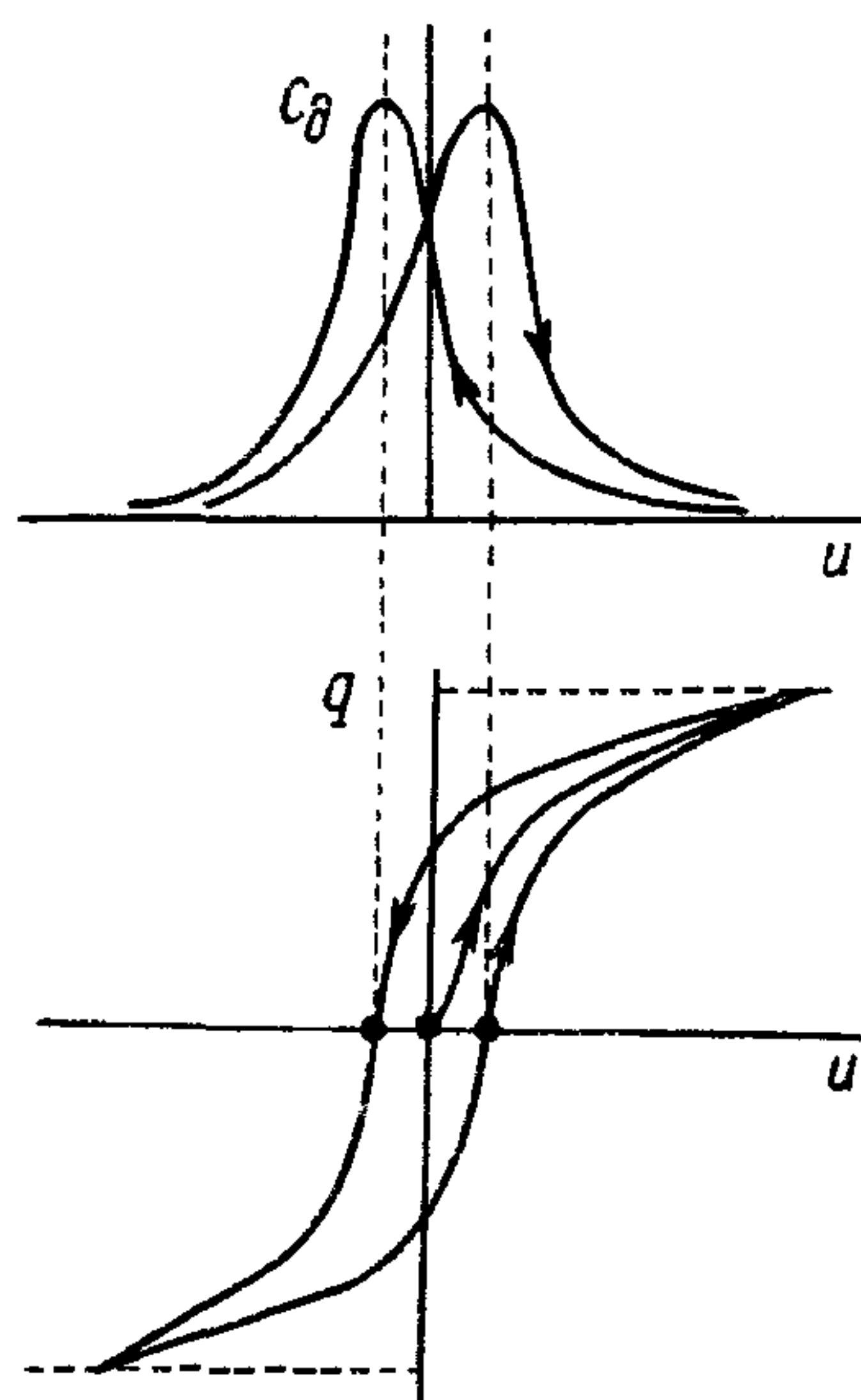


Рис. 328. Кривая гистерезиса для нелинейного конденсатора (внизу) и зависимость динамической емкости ϵ_d от напряжения (вверху).

териала ВК-1 велики, как и у других видов сегнетокерамики; $\text{tg } \delta \approx 0,04 \div 0,05$, но может достигать и до 0,1 при повышенных значениях напряженности поля.

В л и н е й н ы х, обычных конденсаторах величина заряда Q увеличивается прямо пропорционально приложенному напряжению U (величина $\epsilon = \text{const}$), а потому емкость конденсатора, определяемая выражением (1), является величиной вполне определенной. В н е л и н е й н ы х, сегнетоэлектрических конденсаторах величина заряда Q нелинейно изменяется с ростом напряжения U , стремясь к насыщению (рис. 328), т. е. ϵ , как указывалось выше, в данном случае меняется с напряженностью поля. Поэтому емкость, т. е. отношение заряда к напряжению, для нелинейного конденсатора уже не является определенной величиной, а будет зависеть от напряжения. В связи с этим приходится вводить

новые определения для понятия емкости нелинейных конденсаторов.

Нормальная, или статическая, емкость — отношение заряда Q_- , установившееся по окончании зарядки конденсатора постоянным напряжением U_- :

$$C_- = \frac{Q_-}{U_-}. \quad (316)$$

Это значение емкости зависит от напряжения и характеризует нелинейный конденсатор при его использовании в цепях постоянного тока.

Эффективная емкость — емкость такого линейного конденсатора, заряд которого Q_m при максимальном значении напряжения U_m равен заряду данного нелинейного конденсатора при том же напряжении:

$$C_{\text{э}} = \frac{Q_m}{U_m}. \quad (317)$$

Эффективная емкость определяет ток, потребляемый конденсатором, и является важной характеристикой нелинейного конденсатора при его работе в цепях переменного тока.

Дифференциальная емкость (динамическая) определяется скоростью изменения заряда при изменении напряжения:

$$C_d = \frac{dq}{du}. \quad (318)$$

Эта величина пропорциональна тангенсу угла между касательной к кривой $q = f(u)$ и осью абсцисс; она является изменяющейся величиной в пределах периода колебаний переменного напряжения и приобретает максимальное значение, когда кривая петли гистерезиса $q = f(u)$ пересекает ось абсцисс (рис. 328).

Реверсивная емкость представляет собой эффективную емкость в условиях, когда на переменное напряжение с небольшой амплитудой U_m накладывается постоянное напряжение U_- :

$$C_p = \left(\frac{Q_m}{U_m} \right)_{U_-}. \quad (319)$$

Реверсивная емкость является важной характеристикой нелинейного конденсатора при его работе в цепях пульсирующего напряжения, содержащего как постоянную, так и переменную составляющие.

Номинальная емкость представляет собой эффективную емкость нелинейного конденсатора, измеренную при номинальном синусоидальном напряжении и нормальных условиях окружающей среды.

Качество нелинейных конденсаторов — варикондов оценивают также коэффициентом нелинейности, ха-

характеризующим возрастание емкости с напряжением в левой части зависимости $C = f(U)$ (рис. 329, а). Для отечественной серии таких конденсаторов были выбраны следующие коэффициенты нелинейности:

$$K_1 = C_{30}/C_5 \quad \text{и} \quad K_2 = C_{\text{макс}}/C_5. \quad (320)$$

Здесь $C_{\text{макс}}$ — максимальное значение емкости, а C_{30} и C_5 — значения емкости при напряжениях 30 и 5 в соответственно.

Для варикондов серии ВК-1 с емкостями от 100 пф до 0,2 мкф указывались значения: $K_1 = 2 \div 2,5$ и $K_2 = 3 \div 6$. Величина $C_{\text{ном}}$ измерялась при напряжении 5 в и частоте 50 гц. Максимальная емкость для конденсатора 0,2 мкф может достигать значения

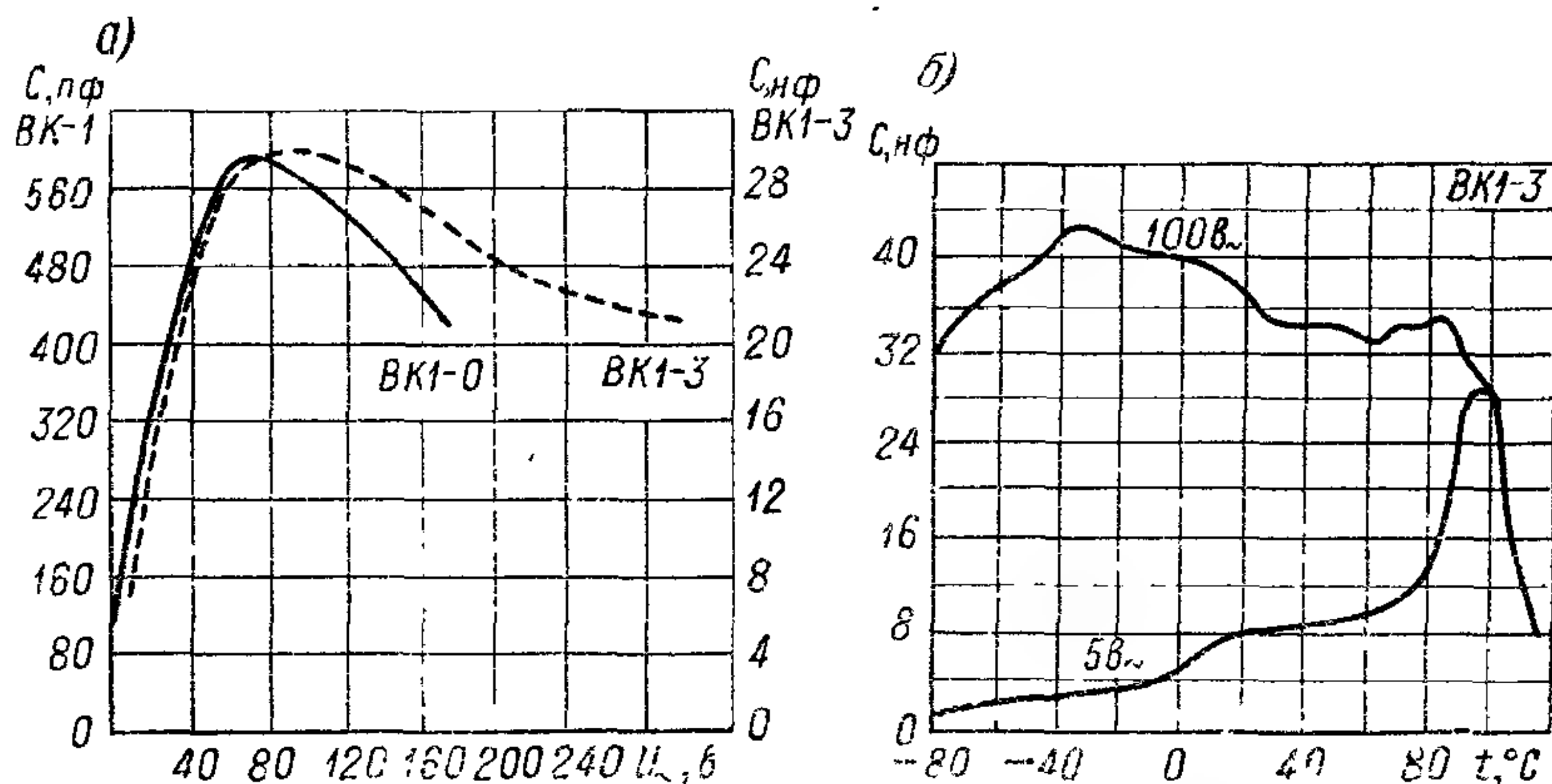


Рис. 329. Зависимость емкости варикондов типа ВК-1 от напряжения (а) и от температуры (б) (ВК-1-0: $C_{\text{ном}} = 100$ пф; ВК-1-3: $C_{\text{ном}} = 6800$ пф).

порядка 1 мкф, что дает удельную емкость порядка 0,3 мкф/см³. Номинальное напряжение данной серии варикондов составляло 250 в пост. тока или 160 в при частоте 50 гц. Допускаемое отклонение емкости от номинала: $-40 \div +100\%$. При малых напряжениях зависимость емкости от температуры, как и зависимость $\varepsilon = f(t)$, выражена очень резко, но при повышении напряжения она сглаживается (рис. 329, б) так же, как и для кривой $\varepsilon = f(t)$ на рис. 327. Ограничив пределы рабочей температуры интервалом $-30 \div +80^\circ \text{C}$, можно получить колебания емкости вариконда в пределах, не выходящих за $\pm 20\%$ от емкости, измеренной при $+20^\circ \text{C}$.

При работе сегнетоэлектрического конденсатора в условиях слабых переменных полей формы кривых тока и напряжения мало отличаются от синусоидальных, и может быть использовано обычное понятие об угле потерь такого конденсатора.

При относительно сильных полях кривая тока в нелинейном конденсаторе имеет сложную форму, отличную от синусоидальной; для несинусоидальных величин нельзя строить векторные

диаграммы, как это мы делали в § 26, а потому понятие угла потерь для нелинейного конденсатора становится условным.

По определению, предложенному Д. М. Казарновским, эффективное значение угла потерь нелинейного конденсатора определяется отношением потерь энергии за один цикл A_d к величине максимальной запасаемой энергии A_m , умноженной на 2π :

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{э}} = \frac{A_d}{2\pi A_m}, \quad (321)$$

или

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{э}} = \frac{\oint u dq}{\pi U_m Q_m}, \quad (322)$$

где интеграл $\oint u dq$ прямо пропорционален площади петли гистерезиса (рис. 328).

Внешний вид сегнетоэлектрических конденсаторов показан на рис. 330. Вариконды уже находят себе применение для различных

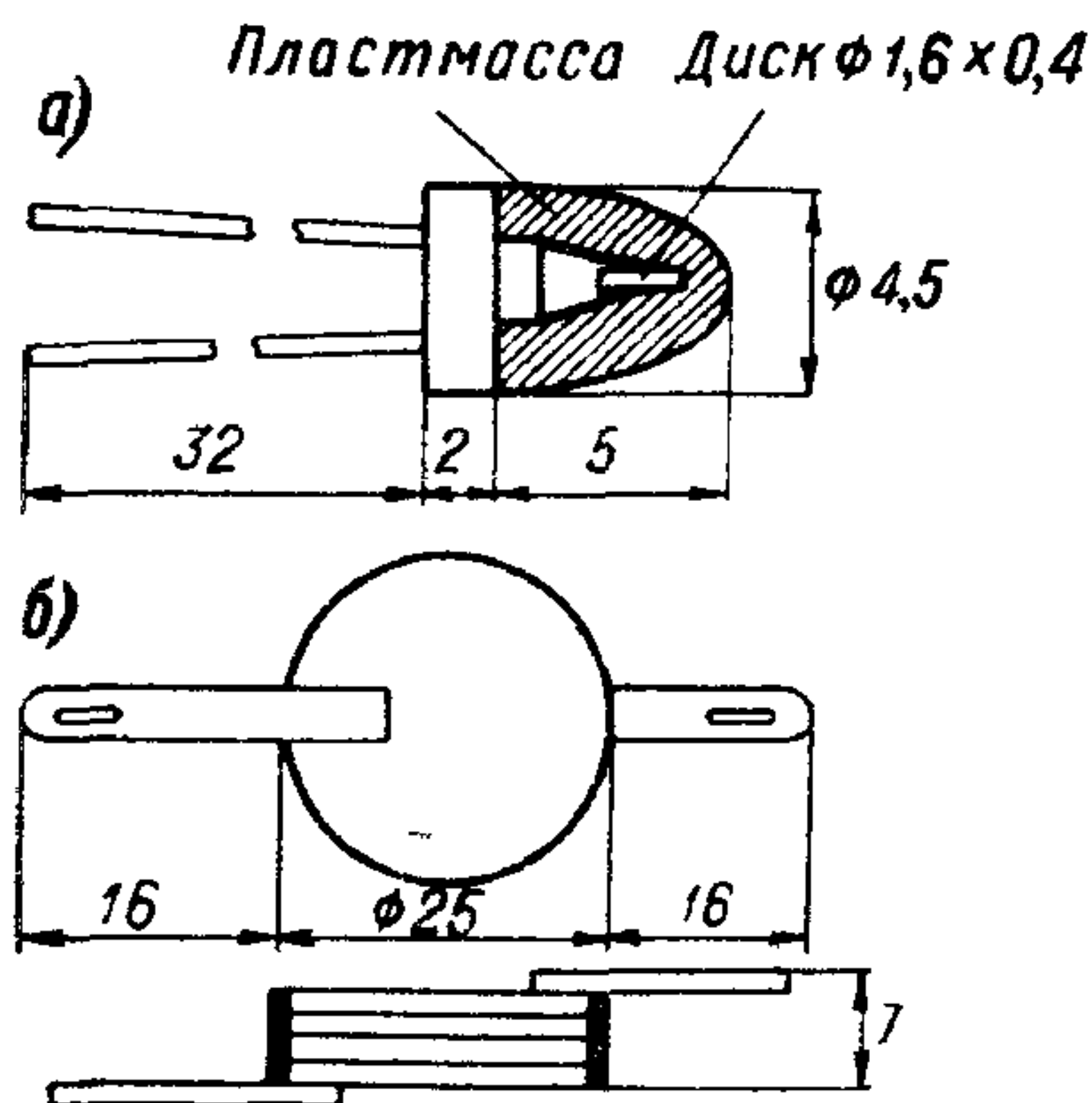


Рис. 330. Вариконды типа ВК-1:
а — ВК-1-0, 100 пф; б — ВК-1-Б,
0,2 мкф).

целей: разработаны диэлектрические усилители сигналов звуковой частоты, усилители мощности с мощностью на выходе до 10—20 вт (достаточной для управления стандартными электродвигателями, применяемыми в автоматике); предложены схемы для настройки контуров (дистанционной) и для частотной модуляции с помощью варикондов; опробовано применение варикондов в качестве датчиков в схемах телеконтроля температур; появление высших гармоник при включении вариконда в цепь синусоидального напряжения (до 50% третьей гармоники и до 20% пятой) позволяет

использовать эти нелинейные конденсаторы для изготовления умножителей частоты; вариконды применяют также в ряде вариантов стабилизаторов напряжения и для других целей.

За рубежом конденсаторы типа наших варикондов, по-видимому, еще не нашли очень большого распространения. Хотя уже на протяжении ряда лет публикуются работы в области исследования электрических свойств нелинейных сегнетоэлектрических конденсаторов, но в рекламах конденсаторных фирм трудно найти сведения о промышленном выпуске подобных конденсаторов. В частности, еще только в 1964 г. в Дании была опубликована статья под названием «Церакап — первый конденсатор с емкостью, зависящей от напряжения», где как о новинке сообщались сведения о выпуске таких конденсаторов в США.

Подробности об особенностях спонтанной поляризации и о сегнетокерамических конденсаторах можно найти в книге Д. М. Казарновского и в работах Т. Н. Вербицкой.

§ 100. Полупроводниковые конденсаторы

При использовании твердых полупроводниковых выпрямителей было установлено, что запиорный слой на границе двух зон полупроводника, обладающих дырочной и электронной проводимостями, имеет определенную емкость. Идея использовать эту емкость в нелинейных конденсаторах была реализована относительно недавно, только во второй половине 50-х годов этого столетия¹.

Образование запиорного слоя схематически показано на рис. 331. Когда положительный вывод источника постоянного тока прикладывается к области полупроводника, имеющей электронную проводимость, а отрицательный — к области, имеющей дырочную проводимость, то с границы раздела этих областей свободные заряды отсасываются к электродам: дырки к отрицательному, а электроны — к положительному электроду; при этом на границе раздела областей с разной проводимостью возникает переходный слой с повышенным сопротивлением — **з а п о р н ы й с л о й**, который можно использовать в качестве диэлектрика в полупроводниковом конденсаторе. Направление приложения напряжения, соответствующее образованию запиорного слоя, называется запиорным, поскольку при этом данная система не пропускает большого тока («заперта»). Толщина запиорного слоя d увеличивается с ростом запиорного напряжения, а в соответствии с этим емкость запиорного слоя снижается. Таким образом, изменяя величину напряжения, приложенного к такому конденсатору в запиорном направлении, мы можем изменять его емкость.

В настоящее время для изготовления полупроводниковых конденсаторов применяют к р е м н и й или г е р м а н и й, причем первый из них значительно чаще. Для создания в кремнии проводимости типа n (электронной) используется введение таких примесей, как фосфор, сурьма или мышьяк, для создания проводимости типа p (дырочной) — бор, алюминий или индий. На границе областей с разной проводимостью возникает так называемый $p-n$ -переход, обуславливающий образование запиорного слоя при соответствующей полярности приложенного напряжения. Можно получить резкий, или с т у п е н ч а т ы й, $p-n$ -переход с резкой границей между областями различной проводимости

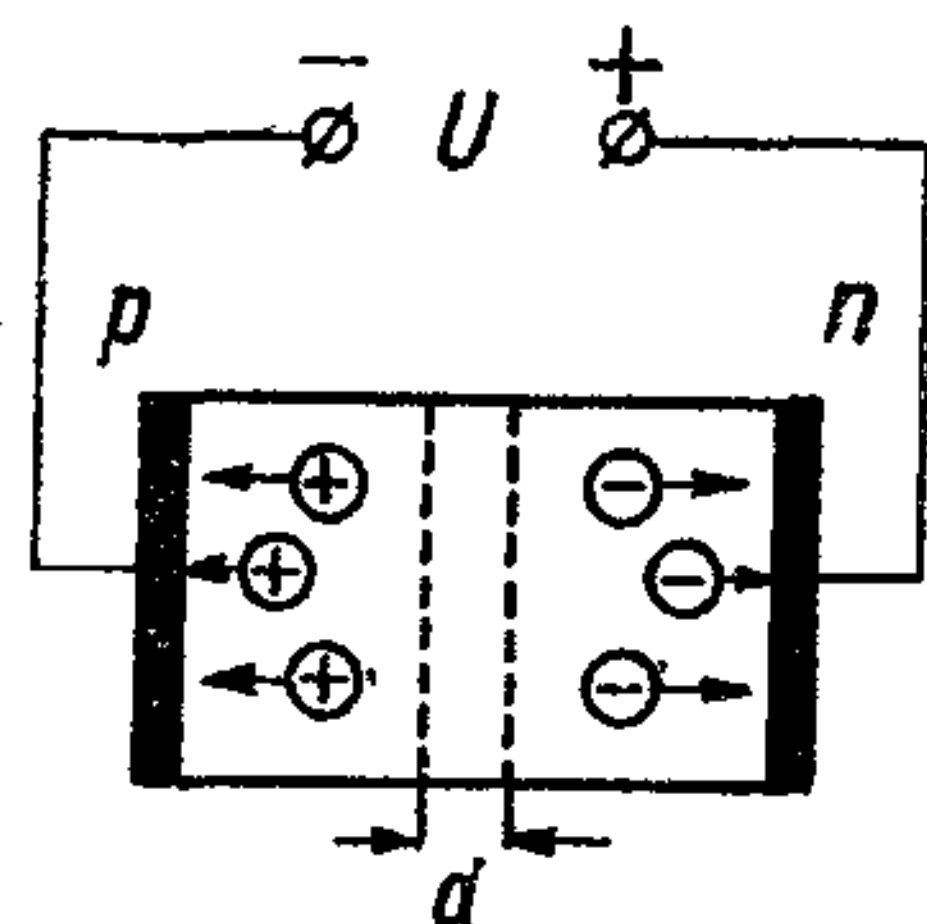


Рис. 331. Схема образования запиорного слоя в полупроводниковом конденсаторе.

¹ Б. М. Вул. Авт. свидет. № 110 441 от 29. VI. 1954 г.

и можно создать постепенный переход от одной области к другой с л и н е й н ы м г р а д и р о в а н и е м; характер перехода влияет на вид зависимости толщины запорного слоя от приложенного напряжения, а следовательно, и на характер зависимости $C = f(U)$. Удельная емкость, приходящаяся на единицу площади запорного слоя, определяется выражением

$$c_{уд} = \frac{\varepsilon}{11,3d} \text{ (нф/см}^2\text{)}. \tag{323}$$

Для германия с удельным сопротивлением 5 ом·см при напряжении $U = 0$ было найдено значение $d \approx 10^{-4} \text{ см} = 1 \text{ мкм}$. При величине $\varepsilon \approx 11 \div 15$ получаем значение $c_{уд} \approx 10\,000 \text{ нф/см}^2$.

Зависимость емкости полупроводникового конденсатора от напряжения определяется выражением

$$C = \frac{K}{(U + U_{\text{к}})^n}, \tag{324}$$

где K — некоторая постоянная, зависящая от ρ полупроводника, U — запорное напряжение и $U_{\text{к}}$ — так называемое внутреннее, или к о н т а к т н о е, напряжение; показатель степени n зависит от характера $p-n$ — перехода: при резком, ступенчатом — $n = 0,5$, а при градированном — $n = 0,33$.

Сравнение некоторых характеристик кремния и германия при их использовании в полупроводниковых конденсаторах дано ниже:

Наименование характеристики	Кремний	Германий
Диэлектрическая проницаемость ε	11,7	15,7
Внутреннее напряжение $U_{\text{к}}$, в	0,5—1	0,2—0,5
Максимальная температура t , °C	150	75
Интервал температур, вызывающий удвоение тока утечки, °C.	11	8
Коэффициент линейного расширения, $\times 10^6 \text{ град}^{-1}$. .	4,7	1,1—6,6

Таким образом, германий имеет несколько повышенную ε и уменьшенное значение внутреннего напряжения, что дает большую чувствительность к изменению запорного напряжения; вместе с тем для германия резко снижена максимальная рабочая температура и увеличена температурная зависимость тока утечки, по абсолютной величине ток утечки для германиевых конденсаторов значительно выше, чем для кремниевых.

По Шаффнеру. выражению (324) можно придать вид:

$$C = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{U}{U_{\text{к}}}\right)^n}, \tag{325}$$

где C_0 — емкость конденсатора при нулевом напряжении, а C — емкость при заперном напряжении U . Значения U_k и n те же, что указаны выше.

Эквивалентная схема полупроводникового конденсатора показана на рис. 332. Здесь C — основная емкость заперного слоя, C_{Π} — паразитная емкость по отношению к корпусу конденсатора, R — параллельное сопротивление утечки, шунтирующее основную емкость и определяющее величину тока утечки, r — сопротивление полупроводника, включенное последовательно с емкостью заперного слоя, L_{Π} — паразитная индуктивность конденсатора.

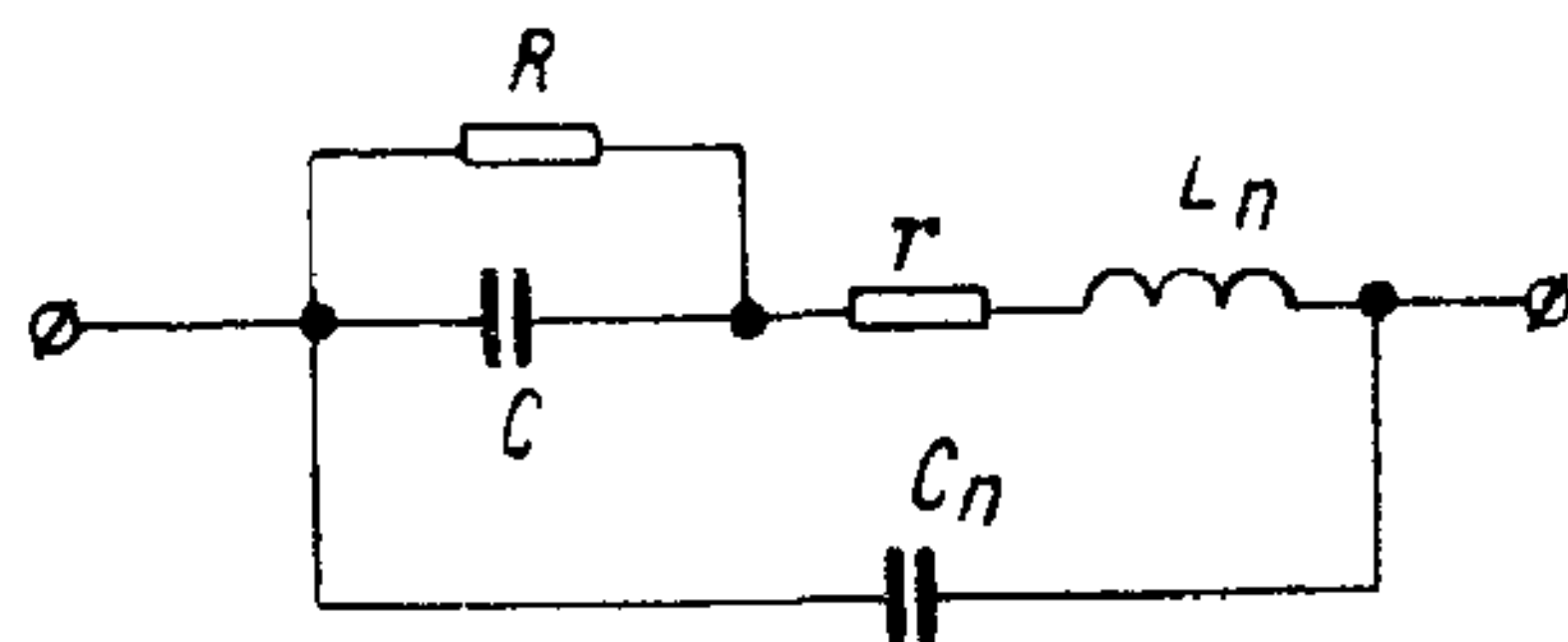


Рис. 332. Эквивалентная схема полупроводникового конденсатора.

Для обычных кремниевых конденсаторов, изготавливаемых в США, имеем: $C_{\Pi} = 0,3 \div 1$ пф, $L_{\Pi} = 5 \cdot 10^{-9}$ гн при герметической конструкции со стеклянным изолятором и $L_{\Pi} = 0,4 \cdot 10^{-9}$ гн при уплотненной конструкции, малогабаритной.

Эффективное значение емкости конденсатора будет равно:

$$C_{\text{эф}} = C_{\Pi} + \frac{C}{1 - \omega^2 L_{\Pi} C}. \quad (326)$$

При частотах ниже резонансной можно принимать:

$$C_{\text{эф}} = C_{\Pi} + C. \quad (327)$$

Добротность полупроводникового конденсатора равна:

$$Q = \frac{1}{\omega (C_{\Pi} + C) r}. \quad (328)$$

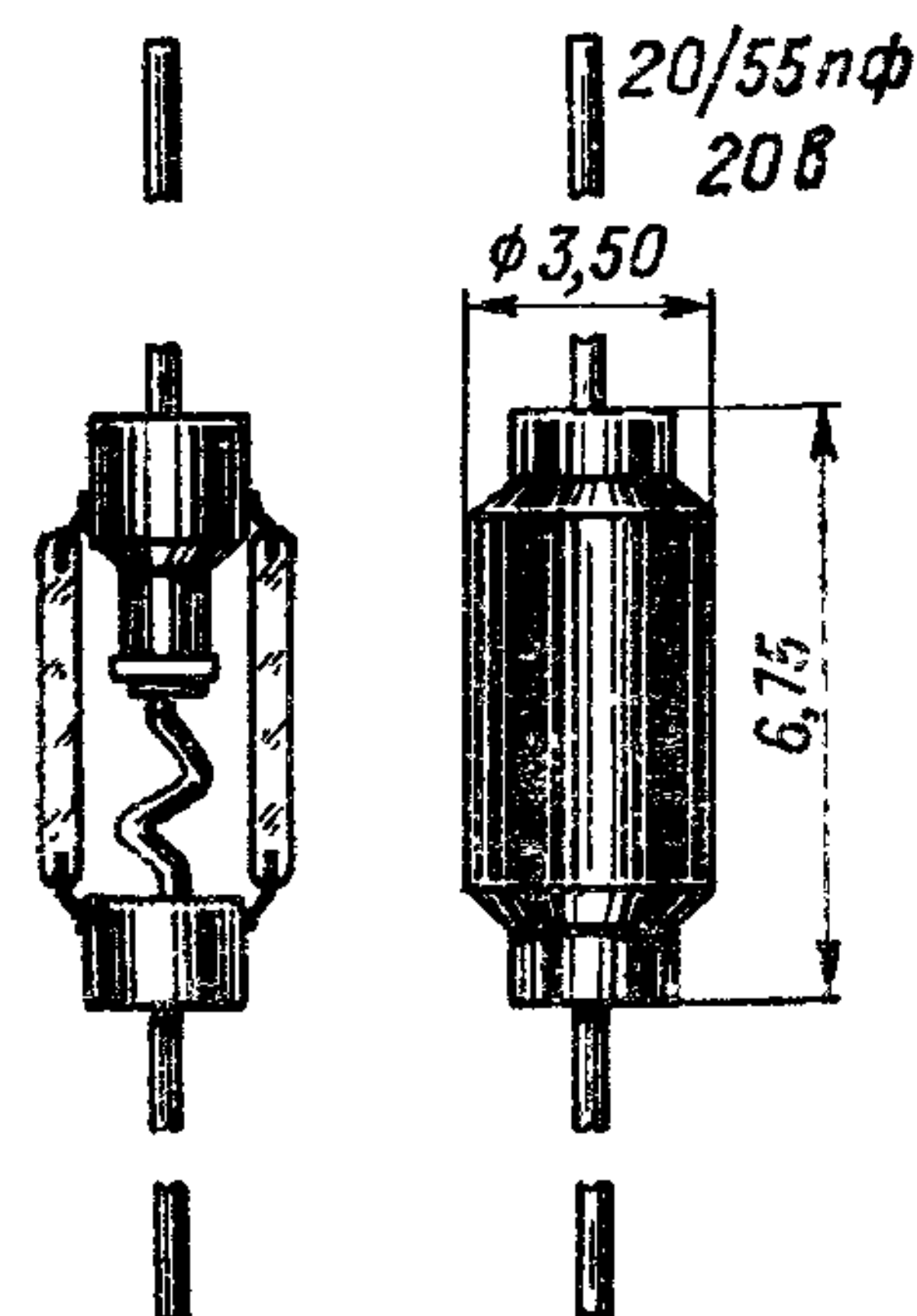


Рис. 333. Полупроводниковый кремниевый конденсатор: 20 в, 20/55 пф.

Таким образом, для повышения добротности надо снижать величину r , т. е. использовать полупроводник с минимальным удельным сопротивлением.

Первые полупроводниковые конденсаторы по существу представляли собой обычные кремниевые диоды, используемые в заперном режиме. Внешний вид такого конденсатора показан на рис. 333 в герметизированном исполнении. Номинальная емкость конденсаторов измеряется при напряжении 4 в. Некоторые данные серии полупроводниковых конденсаторов фирмы Хюгс (США) приведены в табл. 30.

Допускаемое отклонение емкости от номинальной указано равным $\pm 25\%$; отмечается, что при наличии разброса значений

емкости величина показателя степени n в формулах (324) и (325) воспроизводится достаточно точно для заданного типа конденсатора.

Характер зависимости емкости от напряжения (при $n \approx 0,5$) показан на рис. 334. Зависимость емкости от температуры в значи-

тельной степени определяется величиной напряжения, приложенного к конденсатору, как показано в верхней части рис. 335. При малых напряжениях изменения относительно велики, но с увеличением приложенного напряжения температурная зависимость ослабляется и в пределах изменения температуры от -60 до $+150^\circ\text{C}$ изменение емкости умень-

Таблица 30
Полупроводниковые конденсаторы
фирмы Хьюге (США)

$C_{\text{ном}}, \text{ пф}$	Пределы напряже- ния, в	Пределы изменения емкости, пф	Доброт- ность при $U_{\text{мин}}$ и 25 Мгц
35	0,1—130	6—90	75
50	0,1—80	12—120	70
70	0,1—60	20—170	58
100	0,1—25	44—240	43

шается до 2% от ее значения при 20°C . Это соответствует величине $\text{ТКЕ} \approx +100 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Величина добротности Q при изменении частоты проходит через максимум при частотах между 0,1 и 1 Мгц, как показано в нижней части рис. 335; в области частот порядка десятков мегагерц еще можно иметь Q порядка нескольких десятков единиц. По сообщениям 1966 г., заметное улучшение добротности дают так называемые эпитаксиальные полупроводниковые конденсаторы эпикап.

Эпитаксией называется ориентированное наращивание слоев кристаллических веществ; используя этот способ при изготовлении полупроводниковых конденсаторов, можно повысить проводимость полупроводника, т. е. снизить r в схеме рис. 332 и, следовательно, улучшить Q согласно формуле (326). Сообщается, что для конденсаторов типа эпи-кап можно получить $Q \approx 200$ при частоте 50 Мгц. Это соответствует величине $\text{tg } \delta \approx 50 \cdot 10^{-4}$, которую не так легко обеспечить и для обычных высокочастотных конденсаторов при таких значениях частоты. При повышении температуры величина Q несколько снижается; при 120°C добротность снижается примерно в 2 раза. Ток утечки кремниевых конденсаторов невелик и при 20°C не превышает 1 мка, что при

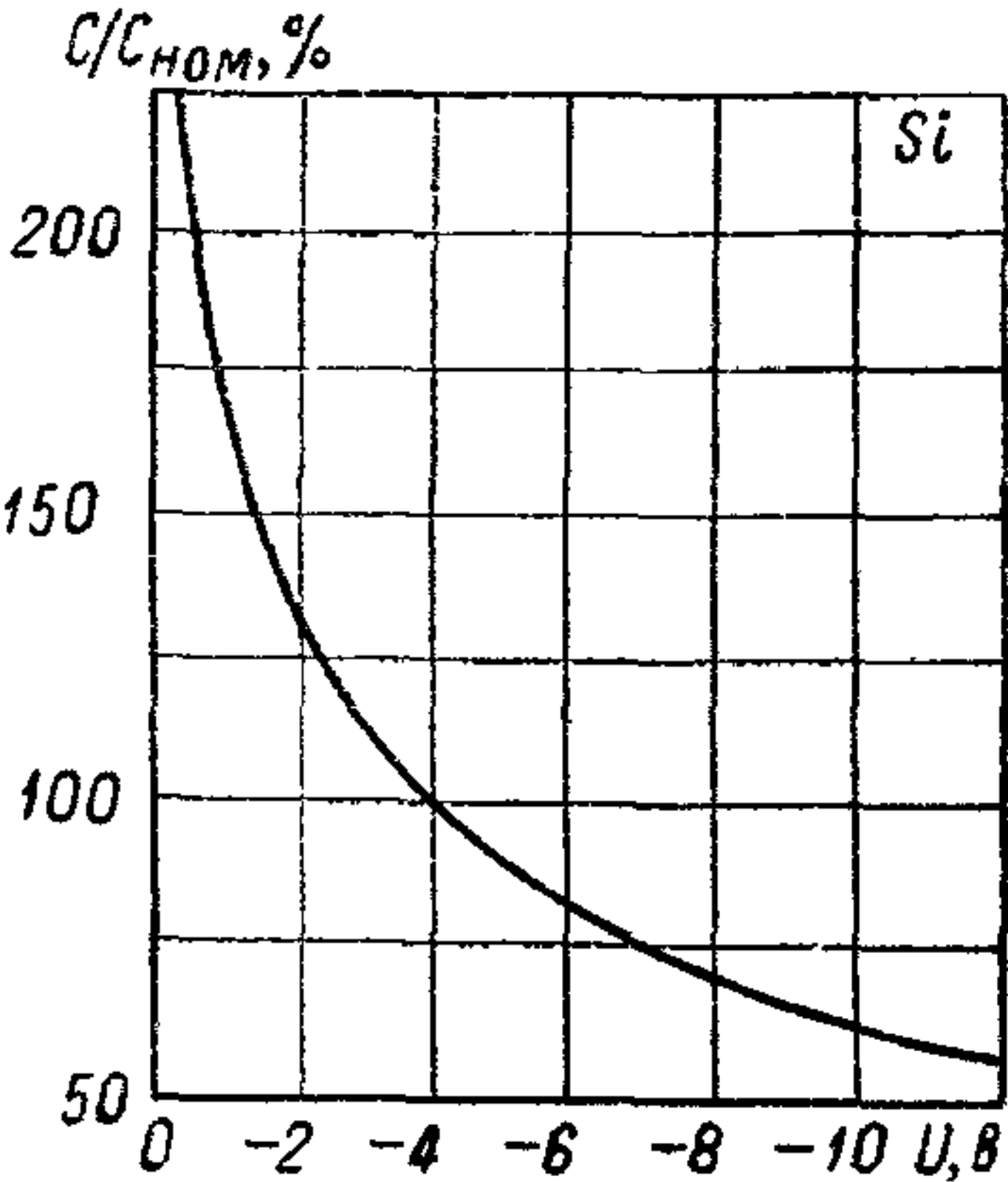


Рис. 334. Зависимость емкости кремниевого полупроводникового конденсатора от приложенного напряжения.

напряжении 100 в соответствует сопротивлению изоляции порядка 100 *Мом*. При температуре 150° С ток утечки возрастает, достигая значения порядка 50 *мка*, что еще дает сопротивление изоляции порядка 2 *Мом*.

При указанных выше характеристиках полупроводниковых конденсаторов, как уже отмечалось, имеется возможность использовать их для настройки некоторых контуров, заменяя воздушный переменный конденсатор системой из полупроводникового конденсатора, источника питания и потенциометра, с помощью которого можно изменять напряжение, подводимое к конденсатору. Несмотря на такое усложнение, благодаря весьма малым размерам полупроводникового конденсатора удастся получить значительное уменьшение объема в сравнении с воздушным конденсатором. Описывается также применение полупроводниковых конденсаторов в схемах модуляции частоты, в усилителях и т. д.

Вопросы применения полупроводниковых конденсаторов привлекают внимание и отечественных исследователей. Л. С. Берман приводит для варикапов типа Д901 А-Е (1965 г.) следующие данные: $U_{\text{макс}} = 80$ и 45 в при 20° С; коэффициент перекрытия по емкости соответственно 4 и 3, а добротность при 4 в, 20° С и 50 *Мгц* — не менее 25 и 30; $C_{\text{ном}}$ при 4 в и 20° С: 22—32, 28—33 и 34—44 *пф*, ТКЕ в интервале $-60 \div +125^\circ\text{С}$ не более $500 \cdot 10^{-6}$ при 4 в и не более $200 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ при 40 в; обратный ток при 20° С не более 1 *мка* и при 125° С — не более 25 *мка*; максимально допустимая мощность в рабочем интервале температур равна 250 *мвт*.

Новым типом полупроводникового конденсатора является конденсатор с поверхностной емкостью, впервые предложенный Пфанном и Гэреттом в 1959 г.¹ Принципиальная схема его устройства показана на рис. 336, а. Используется система: металл — диэлектрик — полупроводник, которая получила за рубежом обозначение MOS, поскольку в ней приме-

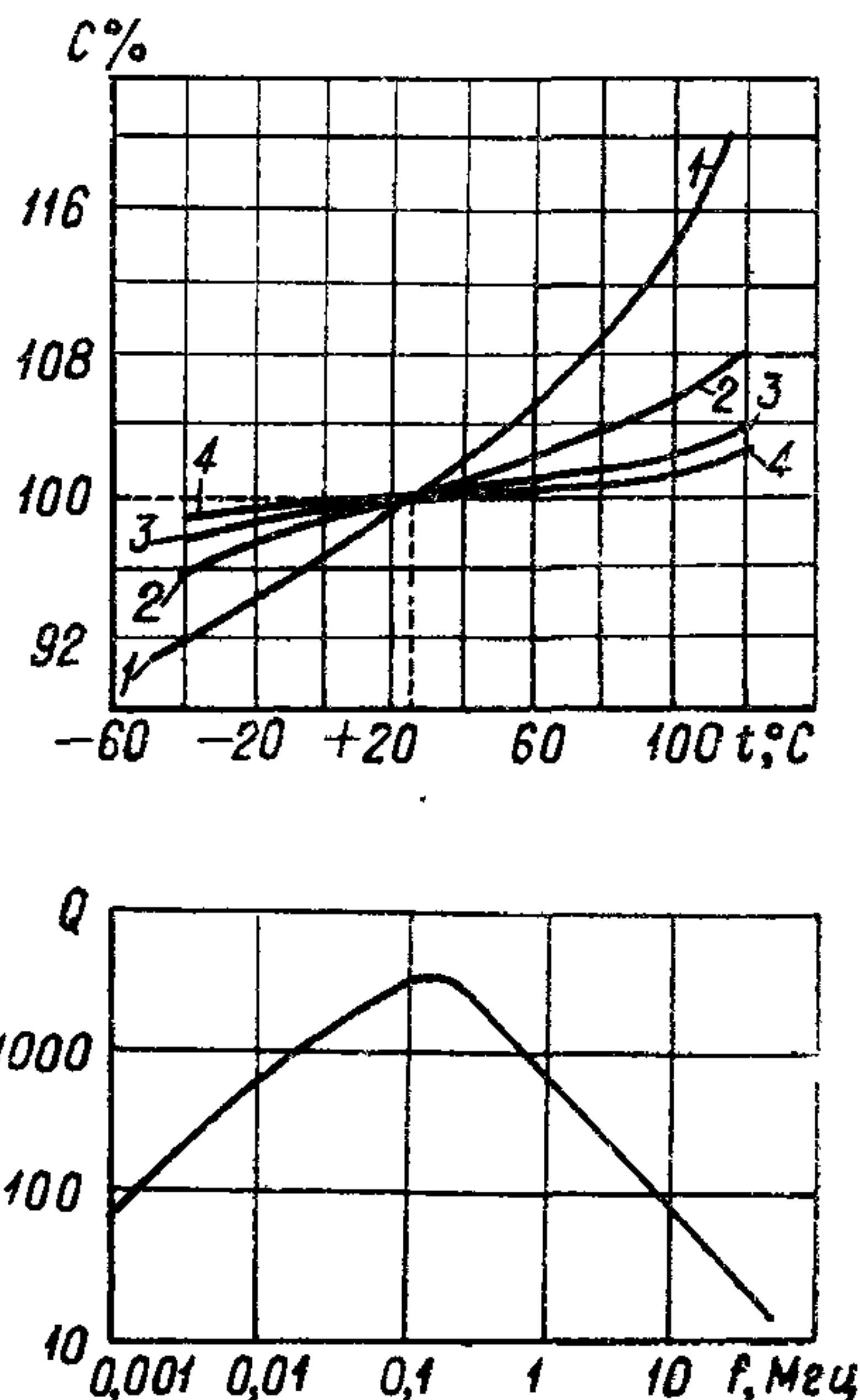


Рис. 335. Зависимость емкости от температуры и добротности от частоты для кремниевого полупроводникового конденсатора.

(1 — 0,5 в, 2 — 2 в, 3 — 4 в и 4 — 6 в)

¹ W. Pfann, C. Garrett. — "Proceed. IRE", 1959, № 47, p. 2011.

нялись металл — оксид кремния — кремний (силиций). Напряжение смещения, поданное на металл, индуцирует в полупроводнике слой пространственного заряда вблизи поверхности раздела металл — полупроводник; переменное напряжение, приложенное к этой системе, распределяется между слоем диэлектрика, областью пространственного заряда и остальной частью полупроводника.

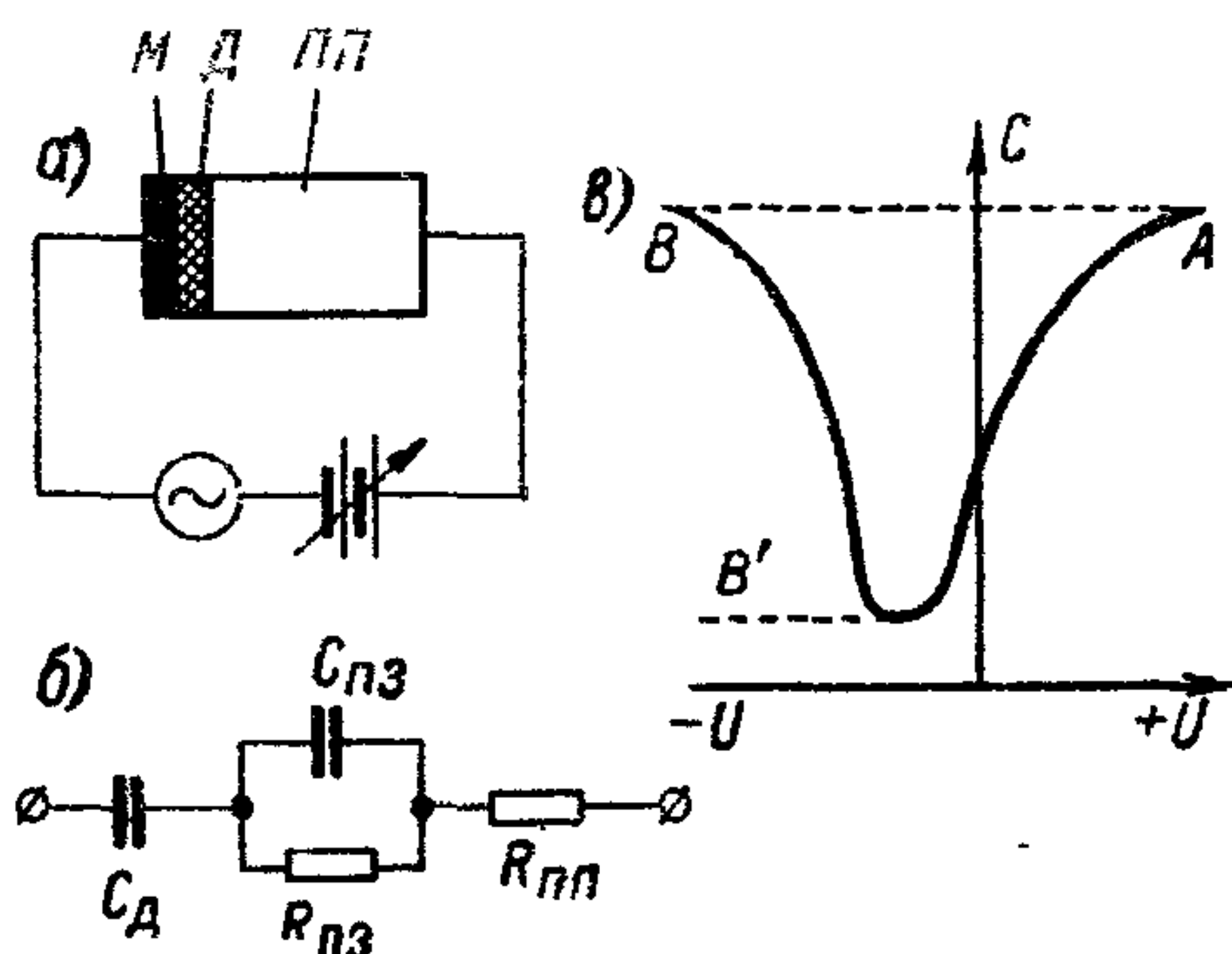


Рис. 336. Конденсатор с поверхностной емкостью: а — схема устройства: М — металлический электрод; Д — тонкий слой диэлектрика; ПП — полупроводник; б — упрощенная эквивалентная схема: C_d — емкость слоя диэлектрика, $C_{пз}$ и $R_{пз}$ — область пространственного заряда, $R_{пп}$ — сопротивление полупроводника; в — общий характер зависимости емкости от частоты: АВ — при низкой частоте; АВ' — при высокой частоте.

В первом приближении упрощенная схема такой системы показана на рис. 336, б: C_d — емкость слоя диэлектрика, $C_{пз}$ — емкость слоя пространственного заряда, $R_{пз}$ — активное сопротивление этой области и $R_{пп}$ — сопротивление остальной части полупроводника.

Изменяя напряжение смещения, мы управляем слоем пространственного заряда, изменяя его полное сопротивление и общую емкость системы. Последняя может изменяться от значения C_{\max} , определяемого емкостью C_d , до значения C_{\min} , определяемого последовательным включением емкости C_d и наименьшего значения емкости $C_{пз}$.

Общий характер зависимости

емкости такого конденсатора от напряжений показан на рис. 336, в применительно к полупроводнику *n*-типа.

В работе А. В. Жаркова рассмотрены подробности принципа действия конденсаторов с поверхностной емкостью и приведены результаты испытания образцов, в которых слой диэлектрика на кремнии был получен не в виде SiO_2 , как обычно, а путем напыления TiO_2 . При емкости $C_d = 0,225 \div 0,57 \text{ мкф/см}^2$ и изменении напряжения на 2 в было получено перекрытие (C_{\max}/C_{\min}) порядка 40—50 до частоты 1 Мгц. При 20 кгц добротность составляла 40—100 при напряжениях смещения выше 0,8 в.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Система и порядок присвоения сокращенных обозначений для элементов (конденсаторов), применяемых в электронной технике.

Сокращенное обозначение составляется из условного обозначения группы элементов (в данном случае класса конденсаторов) и условных обозначений их характеристик (группы конденсаторов данного класса); последний индекс сокращенного обозначения, отделенный от остальных индексов через тире, представляет собой порядковый номер исполнения конденсатора данной группы и обозначает его конструкцию и включает в себя весь комплекс технических требований на данный конденсатор, изготавливаемый по определенному техническому документу.

Условные обозначения групп элементов применительно к конденсаторам (классы конденсаторов):

Конденсаторы постоянной ёмкости	К
Конденсаторы полупеременные (подстроечные, триммеры) . .	КТ
Конденсаторы переменные	КП
Конденсаторы нелинейные (вариконды)	КН

Конденсаторы постоянной емкости разделяются на следующие группы:

Керамические на номинальное напряжение ниже 1000 в . . .	10
Керамические на номинальное напряжение 1600 в и выше . .	15
Кварцевые	20
Стеклянные	21
Стеклокерамические	22
Стеклоэмалевые	23
Слюдяные малой мощности	31
Слюдяные большой мощности	32
Бумажные фольговые на номинальное напряжение ниже 2 кв	40
Бумажные фольговые на номинальное напряжение 2 кв и выше	41
Бумажные с металлизированными обкладками	42
Электролитические алюминиевые фольговые («сухие»)	50
Электролитические танталовые, ниобиевые и др. фольговые	51
Электролитические объемно-пористые	52
Оксидно-полупроводниковые	53
Электролитические с проволочными анодами	54
Оксидно-металлические	55
Воздушные	60
Вакуумные	61
Полистирольные фольговые	70
Полистирольные с металлическими обкладками	71

Фторопластовые (Ф—4)	72
Полиэтилентерефталатные (лавсановые) с металлизированными обкладками	73
Полиэтилентерефталатные (лавсановые) фольговые	74
Комбинированные (пленочно-бумажные)	75
Лакопленочные	76

Примеры обозначений:

- К74—7: конденсатор постоянной емкости, полиэтилентерефталатный фольговый, порядковый номер: 7 (390 пф; 16 кв, см. табл. 25).
К41—1: конденсатор постоянной емкости, бумажный, фольговый, на номинальное напряжение 2 кв и выше, порядковый номер: 1 (0,01—20 мкф; 2,5—40 кв, см. табл. 26).
К53—1: конденсатор постоянной емкости, оксидно-полупроводниковый, порядковый номер: 1 (танталовый; 1,5—100 мкф; 3—100 в, см. табл. 28)

Конденсаторы подстроечные (полупеременные) КТ и переменные КП разделяются на группы по виду диэлектрика:
Вакуумные....1, воздушные...2, газонаполненные....3, с твердым диэлектриком...4 и с жидким диэлектриком...5.

Пример обозначения:

- КП1—1: конденсатор переменной емкости, вакуумный, порядковый номер 1 (см. стр. 539).
Конденсаторы нелинейные КН (вариконды) имеют сокращенное обозначение из четырех индексов:
Первый индекс (группа элементов — класс конденсаторов)....КН;

Второй индекс (основной параметр)	Третий индекс (назначение)
Численное значение минимального коэффициента усиления по переменному напряжению	Ч — управляемые напряжением переменного тока
Численное значение минимального коэффициента усиления по постоянному напряжению	П — управляемые напряжением постоянного тока
Численное значение коэффициента прямоугольности	ВТ — с прямоугольной петлей гистерезиса (для вычислительной техники)

Четвертый индекс — порядковый номер исполнения.

Пример обозначения:

- КН 8Ч—1: конденсатор нелинейный, управляемый переменным напряжением, с минимальным коэффициентом усиления по переменному напряжению, равным 8, порядковый номер: 1.

По данной системе обозначений можно различать новые типы конденсаторов, которые разрабатывались после 1960 года, когда была создана эта система сокращенных обозначений. Ранее разработанные типы конденсаторов, которые далеко не все вышли еще из употребления, имели буквенные обозначения: первая буква К — указывала, что это конденсатор, вторая — указывала тип диэлектрика (Б — бумажный, С — слюдяной, П — пленочный,

Э — электролитический и т. д.), третья указывала особенности конструкции (например, буква Г обозначала герметизированные конденсаторы). (Таким образом обозначение КСГ относилось к слюдяным герметизированным конденсаторам). Позже, для упрощения отказались применять первую букву, К, и обозначения выглядели, например, так: МБГТ — металlobумажный, герметизированный теплостойкий, или: ПКГ—И — пленочной комбинированный герметизированный импульсный. Эти примеры показывают, что даже отказавшись от первой буквы, К, практически не удалось ограничиться обозначением из трех букв, а пришлось применять четыре, причем строгую систему в выборе букв удержать не удалось и после обозначения диэлектрика ставили буквы, характеризующие не обязательно конструктивные особенности, но и область применения (например, И — импульсный). Расширение областей применения конденсаторов и их номенклатуры грозило большим усложнением обозначений конденсаторов и заставило перейти к разработке той системы сокращенных обозначений, которая приведена выше.

В тексте сводных таблиц, которые имеются в книге, можно найти наряду с новыми обозначениями конденсаторов, также и старые обозначения, относящиеся к ранее разработанным типам конденсаторов, которые еще не вышли из употребления. Пока их еще довольно много, однако большая работа по модернизации существующих типов конденсаторов приведет постепенно к замене устаревающих типов конденсаторов — новыми типами, которые уже будут обозначаться только по новой системе сокращенных обозначений.

Со временем эта система обозначений будет расширяться, так как уже сейчас она не охватывает ряда новых типов конденсаторов. Так в ней не предусмотрены, например, полупроводниковые переменные конденсаторы (варикапы), для которых, очевидно, придется ввести новое обозначение группы элементов (класса конденсаторов); в ближайшем будущем должны также появиться новые типы пленочных конденсаторов, например, поликарбонатные, для которых придется открыть новый номер, обозначающий группу (второй индекс в обозначении конденсатора постоянной емкости). Однако система позволяет осуществлять подобное расширение, не нарушая основного принципа ее построения.

ЛИТЕРАТУРА

А. Книги по электрическим конденсаторам

Гинкин Г., Конденсаторы, Радиоиздат, 1935.

Ренне В. Т., Конденсаторы постоянной емкости, НКТП, ГКСК, 1936.

Гюнтершultz А., Бетц Г., Электролитические конденсаторы, перев. с немецкого под ред. Б. М. Тареева, с дополн. В. Т. Ренне, Оборонгиз, 1939.

Жиров Г. А., Сафонов В. Ф., Скоморохов П. Г., Электролитические конденсаторы и их производство, Оборонгиз, 1940.

Ренне В. Т., Электрические конденсаторы (Электрические свойства, методы испытания, конструкция и производство), Изд. Лен. инд. инст., 1940.

Ренне В. Т., Электрические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1947.

Ренне В. Т., Современные бумажные конденсаторы, Госэнергоиздат, 1948.

Поляков Б. А., Конденсаторные установки для повышения коэффициента мощности, Госэнергоиздат, 1950.

Жиров Г. А., Конденсаторы, применяемые в радиотехнике, Госэнергоиздат, 1950.

Бедов Д. Г., Виноградов В. А., Куликов Н. Н., Технология массового изготовления слюдяных и бумажных конденсаторов, Госэнергоиздат, 1951.

Матлин С. Л., Как измерить емкость конденсатора, Госэнергоиздат, 1952.

Ренне В. Т., Электрические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1952.

Аршанский М. Е., Керамические конденсаторы малой реактивной мощности, Госэнергоиздат, 1953.

Гинзбург З. Б., Сопротивления и конденсаторы в радиосхемах, Госэнергоиздат, 1953.

Закгейм Л. Н., Электролитические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1954.

Карпихин В. В., Техника измерения электрических параметров конденсаторов, Госэнергоиздат, 1955.

Казарновский Д. М., Сегнетокерамические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1956.

Закгейм Л. Н., Радиоконденсаторы постоянной емкости и конденсаторные диэлектрики, ВИНТИ, М., 1956.

Ренне В. Т., Удельные характеристики современных электрических конденсаторов, ВЗЭИ, 1956.

Ремонт конденсаторов для повышения коэффициента мощности (инф. письмо № 2/36), Госэнергоиздат, 1956.

Вербицкая Т. Н., Вариконды, Госэнергоиздат, 1958.

- Г о г и ч а ш в и л и П. Ф., Конденсаторные устройства в схемах релейной защиты и автоматики, Изд. Мин. комм. соз., 1959.
- Р е н н е В. Т., Электрические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1959.
- М а л и н и н Р. М., Конденсаторы и сопротивления, 1959.
- К а ш и н Н. В., Механизация и автоматизация производства радиодеталей, Судпромгиз, 1960.
- М а н т р о в М. И., Расчет бумажномасляных конденсаторов для силовых установок, МЭИ, 1960.
- К а р п и х и н В. В., Массовые измерения в производстве радиоcondensаторов, Госэнергоиздат, 1961.
- Б у р л а к о в Б. С., Конденсаторы связи и конденсаторы отбора мощности отечественного производства, ОРГРЭС БТИ, 1962.
- П о л я к о в Б. А., Конденсаторные установки для повышения коэффициента мощности, Госэнергоиздат, 1962.
- «Развитие силового конденсаторостроения», Н. Т. сб., ЦИНТИ эл. пром. и прибор., М., 1962.
- Д э м м е р Дж. В. А., Н о р д е н б е р г Г. М., Конденсаторы постоянной и переменной емкости, перев. с английск. под ред. В. Т. Ренне, Госэнергоиздат, 1963.
- З а к г е й м Л. Н., Электролитические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1963.
- Б о г о р о д и ц к и й Н. П., Ф р и д б е р г И. Д. и др., Радиокерамика, Госэнергоиздат, 1963.
- М о т у с к о Ф. Я., Новые конденсаторы с твердым органическим и неорганическим диэлектриками, ЦИНТИ, 1963.
- Р е н н е В. Т., Пленочные конденсаторы с органическим синтетическим диэлектриком, Госэнергоиздат, 1963.
- С е д а к о в Л. В., Конденсаторные установки, Госэнергоиздат, 1963.
- В а р ш а в с к и й Д. С., Пути повышения качества силовых конденсаторов, ЦИНТИ ЭЛПРОМ, 1963.
- Л е р н е р М. М., Оксидные конденсаторы, ВЗЭИ, 1963.
- П а р н е с М. Г., Механизация и автоматизация изготовления элементов радиоаппаратуры, Госэнергоиздат, 1963.
- Я м а н о в а Л. В. Силовые электрические конденсаторы, ВЗЭИ, 1964.
- В а р ш а в с к и й Д. С., Состояние силового конденсаторостроения за рубежом, вып. 1, Производство силовых конденсаторов, ВНИИЭМ, 1964, вып. 2, Технические характеристики силовых конденсаторов, ВНИИЭМ, 1965.
- Г р и б о в с к и й П. О., Т е р е н т ъ е в а Т. И., Миниатюрные керамические конденсаторы, «Энергия», 1966.
- И л ь я ш е в В. П., Автоматическое регулирование мощности конденсаторных установок, «Энергия», 1966.
- К р о т к о в И. Н., Точные измерения электрической емкости и индуктивности, М. 1966.
- Р е н н е В. Т., Б а г а л е й Ю. В., Ф р и д б е р г И. Д., Расчет и конструирование конденсаторов постоянной емкости, «Техника», 1966.
- Б е р к о в с к и й А. И., Л ы с к о в Ю. И., Мощные конденсаторные батареи, «Энергия», 1967.
- В а р ш а в с к и й Д. С., Пути повышения стабильности конденсаторных масел в электрическом поле, Инф. Стандарт эл., 1967.
- C o u r s e y P. R., Electrical condensers, London, 1927.
- Z i c k n e r G., Über Kondensatoren und ihre Eichung, Leipzig, 1928.
- B a u e r F., Der Kondensator in der Starkstromtechnik, Berlin, 1934.
- D e e l e y P. M., Electrolytic capacitors, N. Y., 1938.
- C o u r s e y P. R., Electrolytic condensers, London, 1939.
- S t r a i m e r G., Der Kondensator in der Fernmeldetechnik, Leipzig, 1939.
- G e o r g i e v A. M., The electrolytic capacitor, N. Y., 1945.
- B r o t h e r t o n M., Capacitors — their use in electronic circuits, N. Y., 1946.

- Marbury R. E., Power capacitors, N. Y., 1949.
- N o t t e b r o c k H., Bauelemente der Nachrichtentechnik — Kondensatoren, Berlin, 1949.
- B l o o m q u i s t W. C., Capacitors for industry, N. Y., 1950.
- D u m m e r G. W. A., Fixed capacitors, London, 1956.
- D u m m e r G. W. A., Variable capacitors and trimmers, London, 1957.
- D u m m e r G. W. A., N o r d e n b e r g H. M., Fixed and variable capacitors, N. Y., Toronto, London, 1960.
- F r ü n g e l F., Erzeugung und Anwendung von Kondensator Ladungen, Leipzig, 1960.
- K o t e c k i J., Kondensatory, Warszawa, 1962.
- K o s s a k o w s k i J., Oporniki i kondensatory radiowe, Warszawa, 1962.
- G r z y b o w s k i S., K o r d u s A., K r o l i k o w s k i C., S e i d e l S., Z e y d l e r - Z b o r o w s k i J., Kondensatory w energoelektryce, Warszawa, 1963.
- F i k e s L., Slaboproudá Technologie, D. 2, — Kondensatory, Praha, 1964.
- G u y o n n e t J., La fiabilité des condensateurs céramiques, Paris, 1967.
- N a r t o w s k i Zb., Baterie kondensatorów do kompensacji mocy biernej, Warszawa, 1967.

Б. С т а т ь и в ж у р н а л а х

К введению

- Р е н н е В. Т., Современное конденсаторостроение, Изв. ЛЭТИ, 1966, вып. 57, ч. 2, 126—144.
- B r a z i e r L. G., S p o r i n g P. A., Capacitor development in Great Britain, «Engng J.», 1959, 42, № 6, 53—59.
- K ü l l m e r H., Kondensatoren für die Fernmeldetechnik, «Fernmelde Praxis», 1959, 36, № 16, 625—624.
- What the military expects from future components, «El-nics», 1959, 32, № 29, 42—43.
- D u m m e r G. W. A., Miniaturization and microminiaturization, «W. W.», 1959, 65, № 12, 545—549.
- T i e z z i A. A., Design trends in tomorrow capacitors, «IRE Tr., Pr. Techn.», 1959, № 5, 20—23.
- L u n c h i k A., Non precision capacitors, «El — nics», 1960, 33, № 11, 173.
- A l l e n J., Precision r. f. capacitors, «El-nics», 1960, 33, № 12, 71.
- H e l l e r S., Do you know enough about capacitors, «El. W.», 1960, 63, № 1, 62—63.
- G i l m o r K., The capacitor, «Popular Electronics», 1961, 12, № 4, 67.
- L e d a L., Miniaturyzacja kondensatorów, pracujących w układach tranzystorowych, «Prz. Tel.», 1962, 35, № 8, 235—239.
- P o d o l s k y L., Capacitors, «Pr. IRE», 1962, 50, № 5, 924—928.
- M c L e a n D. A., American developments in miniature capacitors, «Pr. IRE», 1962, 109, № 22, 457—460.
- B o y e r P., Aspects de la recherche dans une fabrique Suisse de condensateurs, «B S E V», 1962, 53, № 24, 1170—1178.
- S p a g n o l e t t i P. H., Trends in components development, «El. Com.», 1963, 38, № 3, 298—306.
- B o y e r P., Fortschritte in Kondensatorbau, «Tech. Rund.», 1964, 56, № 26, 17. (РЖЭ, 1965, 10Б 98).
- F i s h e r J. R., Notable advances in capacitors made in past year, «Space/Aeronaut.», 1965, 43, № 2, 73.
- Late developments in capacitor design, «El. Ind.», 1965, 24, № 6, 70—73, 148—150. (РЖЭ, 1966, 1Б 93).
- S t r o c h e H., Der Kondensator — ein elektrisches Bauelement mit vieler Gesichte, «Elektr.», 1966, 48, № 30, 711—715.

Basic property charts of fixed capacitors, «El. Engng Des.», 1966, 11, № 5, 140—143. (РЖЭ, 1967, 2Б 107).

D. A. Mc L e a n, Materials for capacitors dielectrics, «IEEE «Internat. Convent. Rec.», 1967, 15, № 7, 108—116.

Capacitors the daily double: tv and computers, «Electron. News», 1967, 12, № 605, Sec. 2, 30. (РЖЭ, 1968, 1Б 116).

J a c k s o n N. F., Dielectric materials in capacitors: theory and applications. «Compon. Technology», 1967, 2, № 8, 5—13.

К главам первой, второй и третьей

Р у с и н Ю. С., Метод приближенного расчета емкости, «Электричество», 1960, № 2, 48—50.

Д а ш у к П. Н., Расчет эквивалентных параметров высоковольтных конденсаторов, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1961, № 3, 27—34.

К у ч и н с к и й Г. С., И р к а е в а К. М., Индуктивность конденсаторов с рулонными секциями, «Вестн. эл. промышл.», 1961, № 11, 38—41.

С м и р н о в М. М., Заряд конденсатора через вентиль от сети переменного тока, «Электричество», 1961, № 10, 60.

П и с а р ч и к Л. И., О емкости анаксиальных конденсаторов, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1964, № 12, 111.

Р е н н е В. Т., Счетная линейка фирмы «Икар» для расчета конденсаторов, «Электропромышленность», 1964, № 242, 52—54.

О г а н е с я н А. Т., К вопросу о величине коэффициента диэлектрической абсорбции для конденсаторов различных типов, Труды ЛПИ, 1965, № 258, 133—137.

К о н о н о в А. П., Расчет емкости плоского конденсатора с учетом краевого эффекта, «Изв. ВУЗ, «Электромеханика», 1966, № 3, 236—242.

R e i t a n D. K., Accurate determination of the capacitance of rectangular parallel-plate capacitors, «J. Appl. Phys.», 1959, 30, 172—176.

S t e p h a n i d e s H., Gesetzmässigkeiten und Ursachen der Schwingungen in Kondensatoren bei Stossentladungen und hochfrequenz Strömen, «El. u. M.», 1960, 77, № 11, 253—261.

O l b r i c h t K. H., Eigenresonanz von keramik Kleinkondensatoren, «BSEV», 1960, 51, № 4, 142—147.

H o i d t f e l d t N., Beregning af papir kondensatorers Kapazität, «Ingeniøren», 1961, B70, № 15, 467—476 (Датск.).

B o y e r P., Des Ladungshaltvermögen und der dielektrische Absorption eines Kondensators, «BSEV», 1961, 52, № 15, 561—569.

B u t t e r w e c k H. J., Die Kapazitätsänderung von Kondensatoren bei geringfügigen Deformation der Elektroden, «Arch. El.», 1964, 49, № 1, 61—67.

B a t k a V., A m b a s P., Odvozeni statiské kapacity z frekvenčního průběhu reálné části admitance, «El. Obz.», 1966, 55, № 7, 356—360. (РЖЭ, 1967, 2Б 36).

S t r u ż a k J., Impedanzja kondensatora cylindrycznego przy wielkiej częstotliwości, «Arch. Elektrotechniczny», 1966, 15, № 1, 87—95. (РЖЭ, 1966, 12 Б 199).

M o l e G., P a r r o t P. G., Effect of the selfresonant frequency of power capacitors on the measurment of discharge magnitude, «Pr. IEE», 1967, 114, № 10, 1560—1561.

К главам четвертой и пятой

Н а з а р о в Н. И., Работа бумажномасляных конденсаторов при несинусоидальном напряжении, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1960, № 1, 49—53.

А в в а к у м о в В. Г., Мощность однофазного силового конденсатора при несинусоидальном напряжении, «Электричество», 1964, 37, № 1, 15—18.

К а з а р н о в с к и й Д. М., Потери в обкладках конденсаторов, Изв. ВУЗ, «Электромеханика», 1964, № 11, 1297—1304.

Кучинский Г. С., Малоиндуктивный конденсатор с малыми потерями в колебательном режиме, «Электричество», 1964, № 7.

Конотоп В. В., Липецкий В. Я., Фертик С. М., Малоиндуктивные конденсаторы, «Электричество», 1965, № 1, 23—26.

Казарновский Д. М., Потери в обкладках конденсаторов при колебательном режиме, Изв. ВУЗ, Энергетика, 1966, № 8, 28—31.

Żaboklicki E., Przybliżona metoda obliczania mocy, wydzielanej w kondensatorach linii sztucznych, «Prz. Tel.», 1962, 34, № 4.

Bohn R., Heywang H., Kammermaier J., Preisinger H., Elektrochemische Selbstheilung in Kondensatoren mit metallisierten Dielektrika, «S. Z.», 1962, 36, № 11, 808—811.

Shill H., Recent developments of thin layer foil capacitors, «NTZ», 1962, 15, № 11, 549—553.

Widai J., Szeliga J., Zarukewicz M., Pasty srebrowe do wyrobów ceramiki radiowej, «Skło i ceramika», 1962, 13, № 2, 45—57.

Kammermaier J., Untersuchungen der Umsetzungsprozess bei Durchschlagen in Kondensatoren mit metallisierten Dielektrika, «Freq.», 1964, 18, № 5, 145—150.

Hagedorn H., Berechnung der Verlustleistung von Kondensatoren bei Belastung mit nicht sinusförmigen Wechselspannungen, «Freq.», 1965, 19, № 11, 370—374.

Swart R., Bird L., Factors affecting the current rating of r. f. capacitors, «IEEE Tr. P., Mat., Pack.», 1965 1, № 1, 205—209.

К главе шестой

Электрическая прочность

Поспишил З., Коллер А., Некоторые вопросы механизма старения титаносодержащей керамики, «Физика диэлектриков», Тр. II Всесоюзной конференции, 1958, Изд. АН СССР, 1960, 13—21.

Богородицкий Н. П., Плащинский Н. Т., Дукаревич Н. В., Процессы электроочистки керамики, там же, 473—479.

Сканави Г. И., Современные представления о пробое диэлектриков, «Электричество», 1961, № 2, 1—9.

Фролов А. И., Электрический пробой микропромежутков в газовой среде, «Электричество», 1961, № 5, 18.

Богородицкий Н. П. и др., Графоаналитический метод расчета напряжения теплового пробоя в в. ч. изолятора, «Электричество», 1961, № 12, 63.

Кучинский Г. С., Каплан Д. А., Разряд вдоль слоев бумажной изоляции при постоянном напряжении, «Вестн. эл. промышл.» 1960, № 6, 50—52.

Воробьев А. А., Воробьев Г. А., Некоторые закономерности электрического пробоя твердых диэлектриков, «Пробой диэлектриков и полупроводников». Доклады IV Конференции, 1963 г., «Энергия», 1964, 12—23.

Ренне В. Т., Электрическая прочность бумажных конденсаторов, там же, 23—35.

Богородицкий Н. П., Волокобинский Ю. М., Электрическая прочность керамических диэлектриков, там же, 35—41.

Волокобинский Ю. М., Механические напряжения, приводящие к разрушению керамической изоляции в в. ч. электрическом поле, там же, 124—126.

Гедзюн В. А., Электрическая прочность радиокерамики, там же, 135—138.

Драник К. С., Электрическая прочность синтетической слюды при высоких температурах, там же, 142—143.

Варшавский Д. С., Электрическая прочность бумажносоволового диэлектрика, там же, 163—167.

Ш о ф м а н О. С. Электрическая прочность и повышение надежности конденсаторов с бумажной изоляцией, там же, 184—186.

М а н н А. К., Электролюминисценция трансформаторного масла, там же, 215—219.

Г р е й с у х А. М., С е в а с т ь я н о в Н. Н., О критической ионизации в бумажномасляной изоляции при постоянном напряжении, там же, 293—296.

К о й к о в С. Н., Ц и к и н А. Н., Изменения пробивного напряжения, толщины и веса полимерных пленок при ионизационном старении, там же, 311—315.

О д ы н е ц Л. Л., П л а т о н о в Ф. С., Р а й к е р у с П. А., Электрическая прочность оксидных пленок на алюминии, там же, 323—326.

К у н и н В. Я., Ц и к и н А. Н., Изучение процессов, происходящих в рутиловой керамике и монокристаллах рутила под действием электрического поля, там же, 343—347.

К у ч и н с к и й Г. С., Л ы с а к о в с к и й Г. Г., Исследование начальных стадий ионизационных процессов в бумажномасляной изоляции, Изв., ВУЗ, «Энергетика», 1964, № 8, 32—39.

К у ч и н с к и й Г. С., Теория развития частичных разрядов в масляных прослойках бумажномасляной изоляции, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1965, № 7, 26—31.

Р е н н е В. Т., С т е п а н о в С. И., Л а в р о в а Д. С., Ионизационные процессы в диэлектрике бумажномасляных конденсаторов при постоянном напряжении, «Электричество», 1963, № 5, 67.

П и н т а л ь Ю. С., Ионизационные характеристики и старение бумажномасляной конденсаторной изоляции, «Электротехника», 1965, № 1, 58—60.

Р е н н е В. Т., О секционировании намотанных конденсаторов высокого напряжения, «Электричество», 1965, № 7, 91—92.

П и н т а л ь Ю. С., Характеристики начальной стадии частичных разрядов в бумажномасляной изоляции при переменном напряжении, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1967, № 4, 18—24.

К r a s u c k i Z., C h u r c h H. F., G a r t o n C. G., A new explanation of gas evolution in impregnated paper, «J. of the Chemical Society», 1960, 107, № 7, 598.

G a r t o n C. G., Research on insulation, «Radio and Electronic Components», 1962, 3, № 7, 567.

A r t b a u e r J., Elektrische Festigkeit von Polymeren, «Kolloid Zeitschrift für Polymere», 1965, 202, № 1, 15—25.

S k o w r o ŋ s k i J. I., Recherches d'une méthode convenable pour déterminer la rigidité dielectrique des huiles isolantes, «CIGRE», 1965, p. 131.

K r a s u c k i Z., Breakdown of liquid dielectrics, «Proceed. Royal Society», 1966, A294, № 1438, 393—404.

K u t c h i n s k y G. S., K a p l a n D. A., P i n t a l Y. S., P e r e s e l e n t s e v I. F., M e d v e d e v S. K., M e s s e r m a n G. T., M a n n A. K., Décharges partielles et durée de vie de l'isolement des condensateurs, CIGRE, 1966, p. 137.

S t r i g e l R., Der Durchlagmechanismus in Luft, Öl und feste Isolierstoffe, «ETZ—A», 1966, 87, № 2, 34—40.

S c h ö n e G., Zum Einfluss von Gasblasen auf die Durchschlagspannung von Isolieröl, «Elektrie», 1967, 21, № 9, 338—340.

Надежность

С о т с к о в Б. С., Р о с т о в с к а я С. Е., Характеристики надежности сопротивлений и конденсаторов, «Автом. и телемех.», 1960, 21, № 5, 633—638.

Л е о н т ь е в Д. П., О законах распределения постоянных отказов элементов радиоэлектронной аппаратуры. Тр. Ин-та электронно-вычислит. техники АН Латв. ССР, 1963, № 5, 152—153.

Б я л ы й Л. И., Л е в и н Б. Р., Оценка параметров распределения надежности по результатам испытания, «Радиотехника», 1964, № 9, 53—61.

А л а д ь е в А. Т., Надежность керамических конденсаторов большой мощности, «Электричество», 1962, № 2, 30—33.

Н е к р а с о в М. М., Ф р а н ч у к А. Н., Оценка надежности керамических трубчатых конденсаторов, Изв. ВУЗ, «Радиотехника», 1964, 7, № 3, 371—375.

Ф р а н ч у к А. Н., Конструктивные характеристики и надежность керамических трубчатых конденсаторов, Изв. ВУЗ, «Радиотехника», 1964, 7, № 4, 524—526.

M a y e u r J. P., Etude de la longevité probable des condensateurs au papier, «Schweizerische Technische Zeitschrift», 1960, 57, № 20, 419—423.

G a l a R., Zuverlässigkeit und Lebensdauerverhalten von elektrischer Bauelemente, «Techn. Rund.», 1961, 53, № 37, 7—11.

S m i t h E. E., Reliability of tantalum foil type of electrolytic capacitors, «Pr. IEE», 1962, 109, № 22, 543—547.

M a g u i r e D. E., Expressing capacitors reliability accurately, «El. Ind.», 1962, 21, № 12, 100—105.

G r e s i a k K., Rozwój i kierunki badań teorii niezawodności sprzetu elektronicznego, «Prz. Eln.», 1963, № 10—11, 557—562.

G u y o n n e t J., L'analyse des défauts et l'étude de la fiabilité par des methodes physiques, «Onde El.», 1963, 43, № 438, 934—940.

D u m o u P., La garantie de la fiabilité des composants électroniques, «Onde El.», 1963, 43, № 438, 906—912.

M e n l e a u C. A., High reliability testing and assurance for electronic components, «El. Com.», 1963, 38, № 3, 307—324.

P a c z k o w s k i E., Wyniki badań stabilności kondensatorów styro-fleksowych i ceramicznych, «Prz. Eln.», 1963, 4, № 10—11, 624—625.

W e i n m a n G., Die Zuverlässigkeit elektronischer Bauelementen, «NTZ», 1963, 16, № 11, 578—580.

A c k m a n W., D e i x l e r A., Die Zuverlässigkeit elektronischer Bauelemente, «ETZ—B», 1964, № 6, 129—134.

G r e s i a k K., K o l o d z i e j s k i J., O wykorzystaniu rozkładu logarytmiczno-normalnego w badaniach niezawodności, «Prz. Elt.», 1964, XL, № 9, 386—390.

E n d i c o t t H. S., H a t c h B. D., S o b m e r R. G., Application of the Eyring model to capacitor data, «IEEE Tr. Comp. P.», 1965, 12, № 1, 34—41.

G i r l i n g D. S., Capacitor reliability, life and the relevance of circuit design, «Radio and Electron. Components», 1966, 31, № 6, 371—384.

J. K a t o n a, Neue Forschungsergebnisse auf dem Gebiete der Züver-kässigkeit elektronischer Bauelemente, «NT», 1968, № 1, 7—10.

D e w a i d e H. Th., P o p k e m a P., Reliability and stability of miniature polystyrene capacitors, «Mullard Techn. Communs», 1967, 9, № 88, 206—212.

G i r l i n g D. S., Capacitors. Reliability, life and the relevance on circuit design, «Microelectron. and Reliability», 1967, 6, № 1, 35—51.

К главе седьмой

В о д о п ь я н о в К. А. и др., Электрофизические свойства технических электроизоляционных материалов в условиях радиоактивного облучения, «Электричество», 1960, № 5, 60—66.

К у р л и н В. М., Применение полиорганосилоксановых лаков как влагозащитных покрытий, Изв. ЛЭТИ, 1960, вып. XLIII, 65—71.

Р у д а к о в а В. М., Камера искусственного климата, Тр. ЛПИ, 1965, № 258, 21—26.

П о п л а в с к а я А. Ф., Герметизация керамических конденсаторов эпоксиноволачными компаундами, Изв. ЛЭТИ, 1966, № 57, 173.

П о н о м а р е н к о Е. Д., Электрические и влажностные характеристики эпоксидных компаундов с наполнителями, Тр. ЛПИ, 1967, № 276, 39—45.

Е г о р о в а Л. Н., К а н и с к и н В. А., Нанесение электроизоляционных покрытий методом вихревого напыления пластмасс», там же, 51—57.

А л е к с а н д р о в а Л. И., С о б о л е в В. В., Сорбция влаги органическими изоляционными материалами, там же, 57—61.

K ö r n e r H., Klimatauglichkeit von Kondensatoren den Nachrichtentechnik und die hierfürerforderlich Prüfverfahren, «NT», 1959, 9, № 3, 122—125.

C a m p b e l l F. W., The effects of environment on electronic components, «El. Engng.», 1960, 33, № 388, 366—370.

V e i t h H., Einfluss der Feuchtigkeit auf die elektrische Kenngrößen von Kondensatoren, «NTZ», 1960, № 11, 519—522.

W i c k l e i n H. W., D i c k h a u t R. H., Transient radiation effects in capacitors and dielectric materials, «Wescon Technical Papers», 1961, № 20/3, 6.

S h a n e R. S., The effect of Allen Belt radiation on materials, «IRE Conventions Record», 1961, 9, part 5, 125—128.

F e a k s F. S., K n i g h t B., The effect of radiation on the tantalum-tantalum oxide electrolytics, «Journal of Nuclear Materials», 1961, № 3, 277—283.

D a v i s J. H., R e e s D. W., R i l e y I. H., Silicone encapsulating and potting materials, «Pr. IEE», 1962, B 109, Suppl., № 22, 266—270.

W i c k l e i n H. W., N u t l e y H., F e r r y J. M., Transient conductivity in capacitor dielectrics for gamma radiation pulses, «IEE Trans. on nuclear science», 1963, NS-10, № 5, 131—138.

H a r r i s o n S. E., C o p p a g e F. N., S n y d e r A. W., Gamma-ray and neutron-induced conductivity in insulating materials, «IEE Trans. on nuclear science», 1963, NS-10, № 5, 118—130.

B u b r i s k i W., Electrolytic capacitors in space electronic equipment, «4th Ann. Sem. Rel. Space vehicles», 1963.

D o s h a y I. R., Lambert K. N., Millard R. J., Space radiation evaluation of solid tantalum capacitors, «Proceed. Electronic Components Conference», Washington, 1963, 133—138.

What happens with dielectrics in space?, «El-nics», 1963, 38, № 29, 34.

F e r r a n t e I. F., Effects of environment on capacitors, «Electron. Packaging and Production», 1964, 4, № 6, 60—70.

V i n c e n t R. S., Effects of moisture on capacitor assemblies, «El. Comp.», 1966, 7, № 6, 577—580.

К главам восьмой и девятой

М е д в е д е в С. К., «Перегрузочные характеристика силовых бумажно-масляных конденсаторов», Вест. эл. пром., 1961. № 11, 42.

М е д в е д е в С. К., Удельные тепловые характеристики силовых конденсаторов, «Эл. техн. промышл.», 1962, № 3, 64—67.

Н а з а р о в Н. И., Коэффициент теплопроводности секции бумажно-масляного конденсатора, «Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1962, 38, № 10, 46—51.

Ф р е й м а н н с У. А., К тепловому расчету бумажномасляного конденсатора, «Учен. записки Рижск. Политехн. ин-та», 1965, XIV, № 5.

В а р ш а в с к и й Д. С., Расчет теплопроводности конденсаторной изоляции, «Электротехн. промышл.», 1966, № 264, 23—26.

Л е р н е р М. М., К расчету оптимальных режимов использования конденсаторов в выпрямительных устройствах, Изв. ЛЭТИ, 1966, № 57, ч. 2, 205—217.

Н а з а р о в Н. И., Геометрические факторы и тепловые свойства сильноточного конденсатора, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1966, № 6, 33—39.

M a d a m a G., S a n i G., Un procedimento di misura per determinare la soglia di instabilità termica nei condensatori statici di rifasamento, «Rendiconti Della Riunioni Ann. 63 dell'AEI», 1962, 107.

H a r n e r H., Tantal capacitors «price war» levels off, «El. Des.», 1965, 13, № 7, 12—14.

Living with the capacitor shortage, «Electronic Procurements», 1966, 6, № 3, 18—22.

H o f e r e r H., Kühlungsarten bei Leistungs Kondensatoren und Problem der Temperaturüberwachung, «Roederstein», 1966, № 12, 103—116.

Y e l l a n d H. T., Water cooled power capacitors for various frequencies, «Certificated Engineer», 1967, 40, № 1, 3—6.

К главе десятой

Б ы к о в М. А., В о л о х о в а В. А., Об организации производства высоковольтных измерительных конденсаторов со сжатым газом, «Измерит. техника», 1959, № 4, 30.

Г р о х о л ь с к и й А. Л., Образцовый конденсатор для частот до 200—300 Мгц, «Измерит. техника», 1960, № 6, 43—47.

Я с ь к о в Д. А., Высоковольтный образцовый конденсатор на рабочее напряжение 250 кВ, Изв. ЛЭТИ, 1960, № 43, 54—56, «Вестн. эл. промышл.», 1961, № 2, 51—53.

З а л е с с к и й А. М., К о ч е т о в А. И., Применение элегаза в электротехнике, «Вестн. эл. промышл.», 1962, № 12, 10—13.

Вакуумный конденсатор нового типа — модель «Тесла», «Новоэкспорт» (ЧССР), 1964, 10, № 10, 27.

T h o m s o n A. M., The cylindrical cross capacitor as a calculable standard, «Pr. IEE», 1959, 106, pt. B, № 27, 307—311.

L u c a s H. R., Gas filled low loss capacitors, «El. Dg.», 1960, 30, № 9, 58—62.

K e l l e r A., Konstanz der Kapazität von Pressgas Kondensator, «ETZ-A», 1960, 80, № 21, 757—761.

Mc G r e g o r M. C., T h o m s o n A. M., Some properties and applications of three terminal capacitors, «Proceed. IRE Austral.», 1960, 21, № 11, 683—687.

V i g o u r e u x P., Electrical units and standards, «Pr. IEE», 1960, pt. B, № 33, 235—240.

C u t o s k y R. D., Evaluation of NBS unit of resistance based on a computable capacitor, «J. NBS», 1961, 65, A, № 3, 147—158.

W i e s s n e r W., Offene Kreisplattenkondensatoren für Präzisionsmessungen, «Zeitschrift für Instrumentenkunde», 1961, 69, № 7, 199—204.

New ceramic vacuum capacitors, «El-nics», 1961, 34, № 40, 88—90.

K u s t e r s N., P e t e r s o n s O., The voltage coefficients of precision capacitors, «IEE Trans. Commun. and Electr.», 1963, № 69, T—6, 612—621.

C u r r W., K o e n i g I., Ein neue Druckgaskondensator für hohe Spannungen, «Elektrie», 1964, 18, № 5, 130—133.

C u t k o s k y R. D., Design for temperature and temperature gradient compensated capacitor, smaller than ten picofarads, «J. NBS», 1964, C68, № 4, 305—307 (ПЖЭ, 1965, № 6, 76).

S a r g e n t J. W., L a Z e r t e J. D., Fluorocarbon gases and volatile liquids, «Symp. on El. Insulating gases, 1962», ASTM, 1964, 51—66 (ПЖЭ, 1965, 7Б 50).

H a w l e y R., Z a k y A. A., E l d i n e M. E., Ze-in Insulating properties of high vacuum, «Pr. IEE», 1965, 112, № 6, 1237—1248 (ПЖЭ, 1966, Б 32).

S h i e l d s J. Q., Voltage dependance of precision air capacitors, «J. NBS», 1965, 69C, № 4, 279 (ПЖЭ, 1966, 6 Б 187).

R u d o l f C., Schwefel-Hexafluorid als Lösch-, Kül- und Isoliermittel der Starkstromtechnik, «Elektr.», 1965, 47, № 21, 439—443 (ПЖЭ, 1966, 4 Б 22).

B o u v i e r B., F a l l o u B., Caractéristiques dielectriques de l'hexafluoride de soufre et des mélanges d'azote et d'hexafluoride de soufre, «RGE», 1966, 75, № 2, 179—183.

S a l e s s k y A. M., Die Anwendung von Schwefelhexafluorid in Hochspannungsschaltgeräten, «Elektrie», 1967, № 10, 359—363.

К главе одиннадцатой

Слюдяные конденсаторы

Д у б и н с к и й В. А., Электрическая прочность слюды при импульсном пробое в вакууме, «Электричество», 1961, № 5, 68.

Л е й з е р з о н М. С., Синтетическая слюда, Госэнергоиздат, 1962.

K a n n o M., K o i z u m i Y., Silvered mica standard capacitors, «Bull. Electrotechnical Laboratory» (Japan), 1959, 23, № 2, 145—148.

M o r s e D. B., Capacitors, «Missile Design and Development», 1959, 5, № 6, 92—93 (РЖЭ, 1960, 17Б11).

L y n c h A. S., The temperature coefficients of metallized mica capacitors, «Radio and Electronic Components», 1960, I, № 5, 243—245.

N e w A. A., Some mechanisms of failure of capacitors with mica dielectric, «Pr. IEE», 1960, B107, № 34, 357—364.

Caracteristiques des condensateurs á feuilles de mica pour usage professionnel, «Pièce Détachées», 1960, № 18, 6—8.

G i r l i n g D. S., S a l i s b u r y D., Silvered mica capacitors, «British Communication and Electronics», 1961, 8, № 6, 449—453.

New button mica capacitors feature — good UHF performance up to 125° C, «Canadian Electronic Engineering», 1961, 5, № 8, 25—27.

N e w A. A., Some mechanisms of failure of capacitors with mica dielectric, «Tr. IEE», 1962, 109, № 22, suppl., 488—495.

Lebensdauer Prüfung von Glimmerkondensatoren mit aussteigenden Belastung, «RM», 1962, 758—761.

G o f f a u x R., Sur la conductibilité électrique des feuilles de mica, «RGE», 1964, 73, № 5, 281—295 (РЖЭ, 1965, 2Б87).

G o f f a u x R., Sur le facteur de dissipation des feuilles de mica, «RGE», 1964, 73, № 9, 431—443 (РЖЭ, 1965, 4Б52).

M e d o w s k i J., Zastosowanie metod radiologicznych w badaniach jednorodności kondensatorów mikowych zaprasowanych w tworzywa sztuczne, «Prace Instytutu Tele — Radiotechn.», 1964, 8, № 1, 123—131, 138.

E v a n s A. W., Life performance history of Minuteman design dipped mica capacitors, «IEEE Tr., Comp. P.», 1964, 11, № 2, 352—357.

First major change in high power mica capacitors in over 25 years, «El. Ind.», 1965, № T—7.

R o t h e n s t e i n E. M., Mica capacitors, «El. W.», 1965, 74, № 1, 48—51.

Mica capacitor characteristics, «El. W.», 1965, 74, № 1, 70.

L a c e J. D. D., Characteristics of fixed capacitors, «El. Comp.», 1967, 8, № 12, 1379—1382.

K a n e k o T a k e s h i, Mica capacitors, «Volt», 1967, May, 48—51.

Керамические конденсаторы

М а н д р ы к а Н. А., М е д в е д е в К. Е. Новые керамические высоковольтные конденсаторы, Изв. ВУЗ, «Радиотехника», 1959, № 3, 278—281.

Б о г о р о д и ц к и й И. П., К у л и к Б. А., Ф р и д б е р г И. Д., Диэлектрические потери ионных кристаллов в связи с их структурой, Изв. АН СССР, сер. физ., 1960, № 2.

Б о г о р о д и ц к и й И. П., Пути развития неорганических диэлектриков, Изв. ЛЭТИ, 1960, вып. XLIII, 6—11.

А л а д ь о в А. Т., В а л е о в Х. С., Учет старения диэлектрика при проектировании керамических конденсаторов большой реактивной мощности, «Электричество», 1964, № 3, 37—42.

Некрасов М. М., Савощенко В. С., Керамика с улучшенными электрическими характеристиками, в сб. «Произв. процессы и технол. горн. машиностр.», 1964, 169—171.

Аладьев А. Т., Валеев Х. С., Влияние режима охлаждения керамических конденсаторов большой реактивной мощности на температурные напряжения в диэлектрике, «Электричество», 1965, № 6, 65—68.

Богородицкий Н. П., Фридберг И. Д., Прогресс электроники и керамические диэлектрики, «Электричество», 1965, № 8, 1—7.

Campbell D. S., The use of ferroelectric devices on the base of barium titanate ceramics, «Ceramics», 1959, 10, № 121, 16—23.

Brown F., High dielectric constant ceramics, «IRE Tr. Comp. P.» 1959, 6, № 4, 238—251 (РЖЭ, 1960, 18Б13).

Harmann R., Frekvenčná a teplotna závislost dielektrickej konstanty a stratového uhla niektorých keramických hmôt, «Elektrot. Časopis», 1960, XI, № 4, 223—236.

Marcus B., Ciontea I., Kovacz I., Vişoiu V., Diacono L., Soltar C., Condensatoare ceramica pentru radiotehnica, «Electrotehnica», 1960, 8, № 9, 321—327 (Румын.).

Winogradow L., Widai B., Wyniki prac nad tworzywem ceramicznym na kondensatory o temperaturowym współczynniku przewodności, «Szkło i ceramika», 1960, II, № 4, 108—114.

Thin ceramic films — key to high capacity, «El. Ind.», 1960, № 1, 7.

Recent advantages in ceramic capacitors, «El — nics», 1960, 33, № 1, 96—97 (РЖЭ, 1960, 20Б16).

Stetson H., Schwartz B., Dielectric properties of zirconates, «Journal of American Ceramic Society», 1961, 44, № 8, 420—421.

Blowers G. G., Hurry G. T., Welshby F., Ceramic capacitors, «Pr. IEE», 1962, 109, № 22, 466—468.

Bos J. G., Influence of construction and finishing on the electric properties of tubular ceramic capacitors, «Pr. IEE», 1962, 109, № 22, 514—521.

Cirkler W., Löbl H., Keramischer Sperrschichtkondensator, «SZ», 1962, № 6, 471.

Dunwell R. D., Microminiature capacitor for modern circuits, «El-nics», 1962, № 5, 114—115.

Fabricus J. H., Olsen A. G., How to miniaturize ceramic capacitors, «Ceramic Industry», 1962, 78, № 5, 54—59.

Rickert H. F., Keramische Kondensatoren mit hohe Kapazitäten, «Funk Technik», 1962, № 6, 184—186.

Vincent G. L., Gulton pioneers large size ceramic capacitors, «Ceramic Industry», 1962, 78, № 4, 66—69.

Decher F., Keramische Kondensatoren unter verschiedene Betriebsbedingungen, «NT», 1962, 12, № 10, 382—387 (РЖЭ, 1963, 7Б 114).

Glaister R., Barrier layer dielectrics, «Pr. IEE», 1962, 109, № 22, 423—431 (РЖЭ, 1962, 20Б 72).

Joksh C., Sperrschicht Kondensator, «RM», 1962, 7, 602—606.

Auer J., New tubular ceramic capacitor, «El — nics», 1963, 36, № 33, 43—46.

Air jets fine grind ceramic particles for capacitors, «Milit. Industr. System Design», 1963, 7, № 12, 44—45.

Cronin J. D., Laminated ceramic capacitors, «Milit. Industr. System Design», 1963, 7, № 2, 20—25.

Minimizer aids production of ceramic capacitors, «Ceramic Age», 1963, 79, № 3, 31—42.

Nordquist L., Improvements increase ceramic capacitors reliability, «El. Ind.», 1963, 22, № 9, 76—80.

Peyssou J., Une precieuse gamme de matériaux utilisables aux températures extrêmes, «Onde El.», 1963, 40, № 431, 914—993.

Ceramic capacitors, «Electronic Design», 1964, 12, № 10, 92.

W i n o g r a d o w L., W i d a j J., L u t z e b i r k A., Nowy kierunek rozwoju kondensatorów ceramicznych o wielkich pojemnościach, «Szkło i Ceramika», 1964, 15, № 11, 301—307.

W a y B. E., Ceramics for high temperatures, «Ceramics», 1964, 15, № 186, 46—48 (РЖЭ, 1965, 4Б 55).

Ceramic capacitors maintained $\pm 2\%$ temperature stability, «Electronic Design», 1965, 13, № 3, 74—75 (РЖЭ, 1965, 11Б120).

H e r b e r t J. M., Thin ceramic dielectric combined with nickel electrode, «Pr. IEE», 1965, 112, № 7, 1474—1477 (РЖЭ, 1966, 2Б116).

S o u z a J., PEM for production of fluorinated barium titanate capacitors for operation to 200° C (РЖЭ, 1966, 6Б164).

T r i p p H. P., Understanding ceramic capacitors materials and construction, «Electronic Procurement», 1966, 6, № 11, 40—43.

T o y o d a Hiroo, Studies on dielectric materials, «Japan Telecomm. Review», 1966, № 2, 88—93.

Waku Shigaru, Studies on the boundary layer ceramic capacitor, «Journal of the Institution of Commun. Engineers» (Japan), 1966, 49, № 7 1285—1292.

The 1966 ceramic industry special feature — the titanate ceramics, «Ceramic Industry», 1966, 87, № 1, 37—44 (РЖЭ, 1967, 2Б88).

L. Macfarlane Aric, Survey: ceramic power capacitors, «Component Technology», 1967, 2, № 7, 16—22.

F r a p p a r t K. P., Condensateurs «Cerfeuil», Procédés de réalisation et caractéristiques électriques, «Onde él.», 1967, 47, № 480—481, 524—525.

W e l m a n W. L., Miniature ceramic capacitors for hybrid circuits, «Component Technology», 1967, 2, № 6, 19—20 (РЖЭ, 1968, 1Б133).

Стекланные и стеклоэмалевые конденсаторы

К и т а й г о р о д с к и й И. И., Р о с т о к и н с к и й В. И., Формование стеклопленок, «Стекло и керамика», 1960, № 1.

К и т а й г о р о д с к и й И. И., Р о с т о к и н с к и й В. И., Е л и н е к В. И., Метод определения разрывных и упругих характеристик стекланных пленок, «Стекло и керамика», 1961, № 3, 8—11.

Р е н н е В. Т., Кварцевые конденсаторы, «Электричество», 1961, № 9, 105—107.

K i n u g a w a K., Properties and use of glass-film capacitors, «Electronic Science» (Japan), 1959, № 1, 106—108 (РЖЭ, 1960, 15Б14).

Machine stacks glass capacitors, «El-nics», 1959, 32, № 8, 82—88.

H i n e s L. D., Determinating optimum burn-in for capacitors, «El. Ind.», 1961, 20, № 9, 105—107.

The porcelain capacitor, «Radio — Electronic Components», 1963, 4, № 1, 40—43 (РЖЭ, 1963, 7Б113).

I k e d a Y., H o s h i n o M., Glass capacitors, «Electronic Parts — Materials» (Japan), 1964, 3, № 12, 5—13.

C u t k o s k y R. D., L e e L. H., Improved ten-picofarad fused silica dielectric capacitor, «J. NBS», 1965, 69C, № 3, 173—179.

M a r t i n A. N., Glass dielectric capacitors, «El. W.», 1965, 74, № 1, 54—56 (РЖЭ, 1966, 1Б122).

Glass capacitors offers reliability, «El-nics», 1965, 35, № 23, 172—174 (РЖЭ, 1966, 6Б161).

M a c k e n z i e J. D., Looking through glass for new active components, «El-nics», 1966, 39, № 19, 129—136.

M i k o d a M a s a n a r i, H i k i n o T a d a s h i, H a y a k a w a S h i g e r u, The electrical degradation of a low-loss capacitor, prepared by sintering a glass powder, «IEEE Tr. P. Mat. Pack.», 1967, 3, № 1, 8—13.

H i l l J. D., High dielectric constant glass is key to new capacitor design, «Insulation», 1967, 13, № 6, 43—46 (РЖЭ, 1968, 1Б132).

Тонкослойные конденсаторы с неорганическим диэлектриком

Ермолаев Ю. П., Алимова Р. А., Расчет и анализ точности микропленочных емкостей, Изв. ВУЗ, «Радиотехника», 1963, № 6, 634—638.

Водопьянов К. А. и др., Выбор режима получения диэлектрических пленок осаждением из газовой фазы, Изв. ВУЗ, «Физика», 1964, № 1, 49—51.

Прозоровский Е. Е., Негоденко О. Н., Потери в пленочных конденсаторах с диэлектриком из монооксида кремния, Изв. ВУЗ, «Радиотехника», 1966, IX, № 4, 503—510.

Герминский А. Е., Косцов Э. Г., О механизме прохождения тока в тонкопленочных структурах, «Физ. тв. тела», 1967, 9, № 6, 1695—1701.

Papp G., Control of the thickness of evaporated layers during evaporation, «Rev. Sc. Instruments», 1959, 30, № 10, 911—912.

Siddall G., Vacuum deposition of dielectric films for capacitors, «Vacuum» (London), 1959, 9, January, 274—287.

Dal Bianco B., Peroni M., Boneli A., Dielettrici evaporati, «Industr. Italiana Elettrotecnica», 1960, № 8, 291—294.

Cecil O. B., Orr C. D., Kennimer B. L., Silicon oxide capacitors, «1961 IRE Convention Record», Part 6, 166—174.

Maddocks F. S., Thun R. E., Dielectric properties of evaporated film capacitors, «Electrotechnology», 1961, 67, № 5, 9.

Degenhard H. J., Pratt I. H., Preparation and evaluation of silicon monoxide thinfilm capacitors, «El. Insul. Conference on Materials and Applications», 1962, 192—198 (РЖЭ, 1Б88).

Bruce J. B., Dielectric properties and breakdown of very thin film capacitors, «Vide», 1962, 11, Sept., 168—173.

Maddocks F. S., Thun R. E., Properties of evaporated film capacitors, «J. El. Chem. Soc.», 1962, 109, Febr., 99—163.

Rudenberg H. G., Robinson J. R., White L. C., Titanium oxide and silicone oxide capacitors for microminiature functional circuits, «Solid State Design», 1962, 3, Aug., 27.

Smith E. E., Kennedy D. R., Sputtered dielectric capacitors, «Tr. IEE», 1962, 19, № 22, 504—507.

Sprague J. L., Minham J. A., Wied O. J., Physical and dielectric properties of the metal-silicon dioxide-silicon system, «J. El. Chem. Soc.», 1962, 109, № 2, 94—98.

Weaver C., Dielectric properties of thin films, «Vacuum Technic», 1962, 11, Sep., 169—173.

Wied O. J., Young H. W., A high stability silicon-silicon dioxide capacitor, «El. Insul. Conference on Materials and Applications», 1962, S1, 190—192 (РЖЭ, 1963, 7Б125).

Barnes C. R., Geesner C. R., Pyrolytic deposition of silicon oxide for 600° C film capacitors, «J. El. Chem. Soc.», 1963, 110, № 5, 361—362.

Bruce J. H., Balmer J. R., Vacuum deposited dielectric films, «Dielectrics», 1963, 1, № 1, 2—7, 54—57.

Chaikin S. W., John G. A., Erratic dielectric strength of silicon monoxide film capacitors, «Electrochem. Technology», 1963, 1, № 9—10, 291—299.

Sakurai S., Watabe S., Morie A., A capacitor of titanium dioxide film, produced by thermal decomposition of organic titanium compounds, «Review of Electr. Commun. Laboratory» (Japan), 1963, 11, № 3—4, 175—191.

Peterson D., Evaluation of vapour plated oxide films for capacitor dielectrics, «IEEE Tr. Comp. P.», 1963, Sept., 119.

White P., Thin film dielectrics, «Insulation» (USA), 1963, 9, № 10, 57—66.

Ignatowicz S., Kolodziewski Z., Kondensatory naparowane typu Al — ZnS — Al, «Prz. Eln.», 1964, 5, № 2, 87—92.

Planer G. V., Die Herstellung von Dünnschicht — Kondensatoren mit elektronstrahl Bedampfung, «ETZ — B», 1964, 16, № 23, 666—668.

Pompei J., La pulverisation cathodique et ces applications dans la domaine des couches minces, «Onde El.», 1964, 44, № 453, 1287—1296.

Siddal G., Thin film electronics in the USA, «El. Comp.», 1964, 5, № 3, 212—215.

Shenkel F. W., Thin film capacitor parametre studies, «IEEE Tr. Comp. P.», 1964, CP—11, № 2, 194—204.

Csanády S., Vákuum párologtatott kondenzátorok s silícium oxid és magnésium fluorid dielektrikummal, «Hirádátechnika», 1964, 33, № 8, 43—48 (РЖР и ЭС, 1964, № 8, 108).

Macavoy T. C., Halaby S. A., Substrates for thin film circuitry, «IEEE Tr. Comp. P.», 1964, CP—11, № 1, 15—22.

Silicon dioxide films grown at low temperature, «Bell Laboratory Record», 1964, 42, № 6, 205.

Aries R. S., Recent contribution in the field of thin film capacitors, «El. Comp.», 1965, 6, № 12, 1130—1132.

Bociek P., Kondensatory o dielektrycznej warstwie z tlenku krzemu, «Prace Inst. Tele-i Radio Techn.», 1965, 9, № 2, 113—115.

Keister F. Z., Thin film titanium dioxide capacitors for microelectronic applications, «IEEE Tr. P. Mat. Pack.», 1965, 12, № 1, 16—20 (РЖЭ, 1966, 1Б121).

Novice M. A., Stresses in evaporated silicon monoxide films, «Vacuum», 1965, 14, 385—392.

Nowak W. B., O'Connor J. J., Silicon oxide micromodul capacitor, «IEEE Tr. P. Mat. Pack.», 1965, 1, № 1, 186—193 (РЖЭ, 1966 3Б104).

Walton B., Capacitors with thin oxide film dielectrics, «El. Engng», 1965, 37, № 448, 384—387.

Johansen J., Anker M. U., Nǎvik G., Rein A., Tynnfilmteknikken og dens mubighaten innen elektroteknikken, «Elektrotekn. Tidsskr.» (Norge), 1966, 79, № 10, 149—158 (РЖЭ, 1966, 11Б82).

Hacskaýlo M., Smith R. C., Electrical prorerties of thin film capacitors, «J. Applied Physics», 1966, 37, № 4, 1767—1770 (РЖЭ, 1966, 11Б83).

Budenstein P. P., Hayes P. J., Breakdown conduction in Al-SiO-Al capacitors, «J. Appl. Phys.», 1967, 38, № 7, 2837—2851.

Vratny F., Tantalum oxide films prepared by oxygen plasma anodization and reactive sputtering, «J. Am. Ceramic Soc.», 1967, 50, № 6, 283—287.

Huber F., Witt W., Pan W. Y., Thin-film hafnium — hafnium oxide capacitors for high temperature operation, «Trans. 3rd Internat. Vacuum Congr. Stuttgart, 1965, vol. 2, Part 2», Pergamon Press, 1967, 359—361.

К главе двенадцатой

Конденсаторная бумага

Миров Б. Г., Китаева С. Х., Уменьшение диэлектрических потерь целлюлозы для конденсаторной и высоковольтной кабельной бумаги, «Бум. промыш.», 1959, № 5, 4—7.

Вайсман Л. М., Исследование диэлектрических свойств и оценка качества конденсаторной бумаги. Тр. УкрНИИБ, 1960, вып. 4, 133—143.

Вайсман Л. М. и др., Разработка типовой установки и методики определения тангенса угла потерь в конденсаторной бумаге, Тр. УкрНИИБ, 1960, вып. 4, 143—153.

Китаева С. Х., Исследование влияния золы и ее состава на диэлектрические потери электроизоляционной целлюлозы, Научн. Тр. ЦНИИБ, 1960, вып. 44, 164—175.

Ренне В. Т., Морозова М. Н., Карпова К. И., Конденсаторная бумага с пониженным углом диэлектрических потерь, «Электричество», 1960, № 7, 72—77.

Ренне В. Т., Морозова М. Н., Катионный обмен в конденсаторной бумаге, находящейся в неводной среде, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1960, № 5, 66—69.

Варшавский Д. С., К расчету диэлектрических потерь в пропитанной конденсаторной бумаге, Изв. ВУЗ, «Электромеханика», 1961, № 1, 125—130.

Варшавский Д. С., Расчет электрических характеристик многослойного диэлектрика из пропитанной конденсаторной бумаги, «Электричество», 1961, № 9, 14.

Карлицкий Ш. М., Комаровский Л. Е., Непрерывный размол массы для конденсаторной бумаги, «Бум. промышл.», 1961, № 2, 12—14.

Медведев С. К., Диэлектрическая проницаемость и угол потерь бумажного диэлектрика, «Электричество», 1961, № 8, 66—72.

Милов Б. Г., Китаева С. Х., Пути совершенствования технологии производства целлюлозы для конденсаторной бумаги, «Бум. промышл.», 1961, № 1, 9—12.

Ренне В. Т., Морозова М. Н., Рышавый А., Диэлектрические потери в конденсаторной бумаге чехословацкого производства, Изв. ВУЗ, «Электромеханика», 1961, № 4, 132.

Ренне В. Т., Морозова М. Н., Влияние плотности конденсаторной бумаги на ее свойства в пропитанном состоянии, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1961, № 9, 15—21.

Кундзич Г. А., Вайсман Л. М., Зальцман М. Г., Контроль структуры бумаги, «Бум. и деревообр. промышл.», 1962, № 4, 14—19.

Лосева Ю. П., О структуре конденсаторной бумаги и ее связи с электрическими свойствами, Тр. ВНИИБ, 1962, № 48, 97—107.

Милов Б. Г. и др., Варка целлюлозы для тонкой конденсаторной бумаги, «Бум. промышл.», 1962, № 1, 17—20.

Ренне В. Т., Исследование связи между свойствами конденсаторной бумаги и качеством бумажных конденсаторов, изд. ВЭИ, М., 1962.

Ульберг Р. Ф., Новый цех конденсаторной бумаги на фабрике «Красный Курсант», «Бум. промышл.», 1962, № 6, 4—7.

Вайсман Л. М., Коршнев Э. М., Ускоренные методы испытания конденсаторной бумаги, «Бум. промышл.», 1963, № 8, 18—19.

Вайсман Л. М., Влияние содержания железа и меди в бумаге на качество конденсаторов, «Бум. промышл.», 1963, № 9, 21—23.

Маслеников К. В., Непрерывный размол массы для конденсаторной бумаги, «Бум. промышл.», 1963, № 6, 22—24.

Медведев С. К., О расчете электрической прочности слоистого диэлектрика, «Электричество», 1963, № 18, 62—66.

Неманихин В. Н., Комаровский Л. Е., Выработка тончайшей конденсаторной бумаги, «Бум. промышл.», 1963, № 4, 6—9.

Проскурнин В. П., Бумага для силовых конденсаторов французской фирмы Боллоре, «Бум. промышл.», 1963, № 4, 28—32.

Варшавский Д. С., Влияние катионного обмена в конденсаторной бумаге на диэлектрические потери пропитывающего вещества, Изв. ВУЗ, «Электромеханика», 1964, № 6, 760—764.

Вайсман Л. М., Кундзич Г. А., Метод оценки структуры конденсаторной бумаги, «Бум. промышл.», 1964, № 2, 10—13.

Гутман Б. Б., Ренне В. Т., Гуляева Л. М. и др., Оксидная бумага — новый вид конденсаторной бумаги, «Бум. промышл.», 1964, № 1, 12—13.

Ренне В. Т., Соя Г. П., Исследование нагревостойкости конденсаторной бумаги, «Электричество», 1964, № 9, 76—80.

Варшавский Д. С., К вопросу о влиянии степени термообработки конденсаторной бумаги на электрические характеристики конденсаторов, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1965, № 8, 37—45.

Ренне В. Т., Миров Б. Г. и др. Технические показатели целлюлозы для конденсаторной бумаги с малыми диэлектрическими потерями, «Бум. промышл.», 1965, № 4, 3—9.

Ренне В. Т., Морозова М. Н., Гуляева Л. М., Оксидная бумага для силовых конденсаторов, Тр. ЛПИ, 1965, № 258, 125—131.

Бородулина Л. К., Ренне В. Т. и др., Влияние состава древесной целлюлозы на ее диэлектрические свойства, Тр. ЛПИ, 1967, № 276, 3—10.

Бородулина Л. К., Морозова М. Н., Ренне В. Т., Влияние анионов, содержащихся в электроизоляционной бумаге, на ее электрические свойства, Тр. ЛПИ, 1967, № 276, 10—18.

Шийк С. Д., Вайсман Л. М., Мирочник Ш. Н., К вопросу о повышении электрической прочности конденсаторной бумаги, Сб. Трудов УНР НИИБ, 1967, вып. 10, 86—92.

Fabre J., Les lois de degradation de papier imprégné d'huile, «BSFE», 1959, 9, № 103, 409—419.

Buck J., Winakiewicz A., Papiery elektroizolacyjne, «Przegląd Papierensky», 1959, № 8, 241.

Puszet M. B., Essais de rigidité électrique des papiers pour condensateurs, «Piece Detachée», 1960, № 21, 6—9.

Tichý V., Nový způsob sledování sušícího procesu papírové izolace, «Elektr. Techn. Časopis», 1960, № 1, 19—27.

Tuuri M., Anthoni B., Valkeila P., On the characteristics of aluminium loaded capacitor paper, «CIGRE», 1962, p. 110.

Pierson M., Report of the activities of working group «Papers» from 1958 to 1961, «CIGRE», 1962, p. 159.

Krasucki Z., Processes leading to discharges in oil impregnated paper, «Pr. IEE», 1962, 109, № 22, 435—439.

Renne V. T., A new apparatus for testing capacitor paper, «Radio and Electronic Components», 1962, 3, № 11, 918.

Sakamoto T., Ashima K., Yoshida Y., Improvement of dielectric properties of capacitor paper, «CIGRE», 1962, p. 133.

Simoyama T., Some experiments on the improvement of dielectric loss in the kraft insulating paper, «J. of the Inst. El. Eng. of Japan», 1962, 82, № 3, 362—369.

Stamm H., Kahle M., Die Verbesserung der elektrischen Eigenschaften von Kabel — und Kondensatorpapier, «Wiss. Zeitschr. Hochschule El. Techn. Ilmenau», 1962, 9, № 5, 661—666.

Fournie R., Le Gall Y., Roulet C., Etude de la degradation des papiers de condensateurs sous influence de contraintes thermiques et électriques par spectrographies infrarouge, «BSFE», 1964, 5, № 53, 321—332.

Buck J., Niektóre zagadnienia jakości bibulki kondensatorowej, «Przegląd Papierensky», 1964, 20, № 7, 222—225.

Kelk E., Wilson I. O., The constitution and properties of paper for high voltage dielectrics, «Pr. IEE», 1965, 112, 602—612.

Ludányi J., Papierkondenzátorok átütésbiztonsága, «Hiradástech. nika», 1965, 16, № 8, 239—243 (РЖЭ, 1965, 3Б94).

Neumann H., Smolka J., Papier für elektrischen Kondensatoren, «Zellstoff und Papier», 1965, 14, № 2, 41—45.

Riaux E., Caractéristiques diélectriques aux très basses fréquences du papier pour condensateurs, «Compte Rendue Acad. Science», 1965, 261, № 15, 2845—2847.

Wasowicz S., Miodowski J., Materiały do produkcji kondensatorów, «Przegląd Papierensky», 1965, 21, № 12, 383—385.

Church H. F., Krasucki Z., The ageing of paper capacitors; effects due to ions and the structure of paper, «CIGRE», 1966, p. 112.

Held W., Klahn R., Überlappungswahrscheinlichkeit von Fehlerstellen in geschichteten Dielektrikum, «ETZ—A», 87, № 4, 121—126 (РЖЭ, 1966, 8Б47).

P a t k o J., Kondenzátorokpapirus vi lamo lemezómak figgera a nedvesség tartelontó és a hőmérszlettől, «Elektrotechn.» (венг.), 1966, № 1, 9—14.

R e n n e W. T., Zagadnienia poprawienia jakości papierow elektroizolacyjnych, «Prz. Elt.», 1966, XII, № 7, 274—276.

R i a u x E., Contribution á l'étude des propriétés dielectriques du papier pour condensateurs, «RGE», 1966, 75, № 7—8, 927—938 (РЖЭ, 1967, 1Б79).

S t a m m E. H., Neuere Untersuchungsergebnisse an Papier-Öl-Isolationen, «Wiss. — techn. Mitt. Inst. Prüffeld elektr. Hochleistungstechnik», 1967, № 5, 34—40.

Пропиточные массы

К а л а н т а р Н. Г., Пути повышения качества изоляционных масел, «Вестн. эл. промыш.», 1961, № 7, 66.

А н д р и а н о в К. А., С к и п е т р о в В. В., Синтетические жидкие диэлектрики, М., Госэпергоиздат, 1962, 196.

Д о л г о в Б. Н., Р е н н е В. Т. и др., Влияние состава и строения молекул некоторых кремнийорганических жидкостей на их электрические свойства, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1962, № 6, 31—36.

П е р е с е л е н ц е в И. Ф., П р о с к у р н и н В. П., М е д в е д е в а А. С., Применение синтетических жидкостей для силовых конденсаторов, работающих при низких температурах, «Вестн. эл. промыш.», 1962, № 8, 35—39.

Р е н н е В. Т., Б е р к у А., К а р а б а н о в В. И., К о з ы р е в а М. С., Исследование пропиточной жидкости для силовых конденсаторов, Изв. ВУЗ, «Электромеханика», 1962, № 12, 1424—1428.

Р е н н е В. Т., К а л а н т а р Н. Г. и др., Электрические свойства электроизоляционных масел, полученных из восточных сернистых нефтей, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1962, № 12, 19—25.

Б о н д а р е н к о П. Н., Р е н н е В. Т., С о я Г. П., Жидкие диэлектрики для конденсаторостроения, Изв. ЛЭТИ, 1963, вып. 51, 228—242.

К а п л а н Д. А., Диэлектрическая прочность масла при малых расстояниях между электродами, «Электротехника», 1964, № 10, 17—19.

К а п л а н Д. А., К у ч и н с к и й Г. С., Влияние влажности на электрическую прочность масла, «Электротехника», 1963, № 5, 30—33.

Л и н ш т е й н Р. А., Ш т е р н Е. Н., Зависимость газостойкости масел от структурно-группового состава и физико-химических показателей, «Электротехника», 1964, № 6, 62—63.

П и н т а л ь Ю. С., Растворение газовых включений в минеральном изоляционном масле, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1964, № 7, 95.

В а р ш а в с к и й Д. С., К а л а н т а р Н. Г., Конденсаторное масло из дистиллятов сернистых восточных нефтей, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1966, № 9, 33—38.

Я м а н о в а Л. В. и др., Пропитка бумажных радиоконденсаторов синтетическими жидкими диэлектриками, Изв. ВУЗ, «Радиоэлектроника», 1967, № 3, 10.

K o s i a n J., Impregnace vosky, kompaundy a laky, «Slaboproudy Obzor», 1959, 20, № 8, 490—495.

C l a r k F. M., Synthetic liquid dielectrics, «Mater. Design Engineering», 1959, 50, № 6, 99—105 (РЖЭ, 1960, № 15, 13).

B o r s o d y L., New impregnants for paper capacitors, «IRE Tr., Comp. P.», 1960, 7, № 1, 15—25.

E l s n e r H., Alterung und Verluste von Imprägniermittels für Kondensatoren, «BASE», 1960, 51, № 15, 733—739.

K a t a g u r i M., K o d a t i K., Refining of castor oil for capacitor dielectrics, «Review El. Commun. Laboratory» (Japan), 1960, 8, № 7—8, 376—384.

B l o d g e t t R. B., B a r t l e t t S. C., Parameters for prediction gassing of oils under electric stress, «Power Apparatus and Systems», 1961, № 55, 528—536.

Garn P. D., Bott M. C., Determination of antraquinon in capacitor dielectrics, «Analytical Chemistry», 1961, 33, Jan., 84—85.

Garn P. D., Stabilization of capacitors: deterioration of capacitors occurs by different mechanisms in alternating current and direct current fields, «Industr. — Engineering Chemistry», 1961, 53, Apr., 311—312.

Koenig I., Zum Gasaufnahme von Isolierölen, «Elektrie», 1961, 15, № 5, 166—168.

Siciński Z., O możliwości i ołowści powszechnego stosowania dielektrycznych kryteriów oceny jakości olejów elektroizolacyjnych, «Prz. Elt.», 1961, 37, № 10, 410—417.

Baier E., Kunstwachse in der Elektrotechnik, «Elektr.», 1962, 44, № 40—41, 602—603.

Skowroński J. I., O mechanizmie tworzenia się mostka w procesie przebicia dielektrików ciekłych, «Arch. El. Techn.», 1962, 11, № 3, 565—586.

Gosling C. H., Insulating liquids, «JIEE», 1963, 9, Sept., 380—383.

Boletzký G. V., Verlustfaktor als Alterungskriterium bei Isolierölen, «BASE», 1964, 58, № 8, 370—371.

Coquillon J., Nouveaux liquides dielectriques «Pyralénes» pour l'impregnation des condensateurs au papier, «RGE», 1964, 73, № 11, 565—569.

Poljak F., Umeli tekuté dielektrika pre kondensátory, «Elektrotechnik» (ČSSR), 1964, 19, № 11, 314—316 (РЖЭ, 1965, 3Б34).

Sičínski Z., Neue Kriterium für die Beurteilung und Prüfung von Isolierölen, «Elektrie», 1964, № 11, 347—352.

Hornby E. A., Irving R., Patterson E. A., New criterion of the gassing tendencies of insulating oils, «Pr. IEE», 1965, 112, № 3, 590—596.

Devaney R. G., Cyanethyl sucros — an insulating liquid with a dielectric constant of 35, «EL. Insulating Conference on Materials and Applications», 1963, 130—133 (РЖЭ, 1965, 11Б42).

Buck J., Niektóre zagadnienia związane z wprowadzeniem olejów syntetycznych do produkcji kondensatorów energetycznych, «Prz. Elt.», 1965, XLI, № 9, 343—344 (РЖЭ, 1966, 3Б92).

Knust E., Chlorierte Dielektrika als Tränkmittel für Papierkondensatoren «El. u. M.», 1965, 82, № 3, 132—134.

Tareev B. M., Synthetic liquid electrical insulating materials, «Electr. India», 1965, 5, № 9, 13—28 (РЖЭ, 1966, 6Б15).

Nossier A. and al., Recherches récentes sur les processus fondamentaux dans les dielectriques sous l'influence de champs électriques élevées, «RGE», 1965, 74, № 12, 1009—1014.

New chlorinated dielectrics, «SA Electr. Review», 1967, 58, № 586, 37 (РЖЭ, 1967, 10Б64).

Бумажные конденсаторы

Киреев М. И., Отечественное силовое конденсаторостроение на уровень современных задач, «Пром. энергетика», 1959, № 8, 6—8.

Морозов М. М., Производство силовых конденсаторов и задачи на 1959—1965 гг., «Вестн. эл. промышл.», 1959, № 6, 1—7.

Варшавский Д. С., Метод оценки электрической прочности тонкослойного бумажного диэлектрика силовых конденсаторов, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1960, № 9, 27—29.

Ерюхина З. В., Ионизация в конденсаторном диэлектрике, «Электричество», 1960, № 5, 86.

Назаров Н. И., Переселенцев И. Ф., Влияние коэффициента запрессовки на электрические характеристики бумажномасляных конденсаторов, «Вестн. эл. промышл.», 1960, № 6, 55—60.

Платицын Н. А., О потерях электроэнергии в разрядных сопротивлениях батарей статических конденсаторов, «Пром. энергетика», 1960, № 7, 6.

Ипатенко Н. Р., Автоматическая коммутация косинусных конденсаторов в функции коэффициента мощности установки, «Пром. энергетика», 1960, № 10, 28—29.

П р о с к у р н и н В. П., Производство слловых конденсаторов в ГДР, «Промышл. Подмоскoвья», 1960, № 8, 46—51.

В а р ш а в с к и й Д. С., Влияние влаги на изоляцию бумажномасляных силовых конденсаторов, «Пром. энергетика», 1961, № 9, 14.

М а к с и м о в Г. Н., К у р о ч к и н А. А., Ремонт косинусных конденсаторов, «Пром. энергетика», 1961, № 9, 20.

М е д в е д е в С. К., Конденсаторы для повышения коэффициента мощности параллельно-последовательного соединения, «Пром. энергетика», 1961, № 4, 35—39.

В а р ш а в с к и й Д. С., Л а н ц е в А. Г., Ш о ф м а п О. С., П е т р а ш к е в и ч Н. П., Конденсаторы для повышения коэффициента мощности серий КМВ и КСВ, «Вестн. эл. промышл.», 1962, № 5, 56—62.

В а р ш а в с к и й Д. С., Влияние степени сушки и дегазации бумажного диэлектрика на угол потерь силовых конденсаторов, Изв. АН Каз. ССР, сер. физ., 1962, вып. 1, 24—30.

Д а ш у к Н. П., К у ч и н с к и й Г. С., Л и т в и н о в а Е. Л., Выбор рабочих напряженностей в импульсных конденсаторах, «Вестн. эл. промышл.», 1962, № 9, 49—52.

Н а з а р о в Н. И., Коэффициент запрессовки и уменьшение потерь в бумажномасляном конденсаторе, «Вестн. эл. промышл.», 1962, № 1, 14—17.

П е р е с е л е н ц е в И. Ф., Ионизационные характеристики бумажных конденсаторов, «Вестн. эл. промышл.», 1962, № 1, 17—23.

В а р ш а в с к и й Д. С., К вопросу о кратковременной прочности бумажносоловых конденсаторов, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1963, № 6, 120—123.

Р е н н е В. Т., Бумажные и пленочные конденсаторы, в сб. Итоги науки и техники за 1962—1963 гг., ВИНТИ АН СССР, 1964, 49—95.

П р о с к у р н и н В. П. П е р е с е л е н ц е в И. Ф., Б а е в И. Ф., И в а н н и к о в П. И., Исследование характеристик бумажных конденсаторов, пропитанных хлорированными жидкостями, «Электротехника», 1964, № 8, 18—21.

П е р е с е л е н ц е в И. Ф., Влияние термовакуумной обработки на электрические характеристики силовых бумажных конденсаторов, «Электротехника», 1964, № 6, 48—50.

В а р ш а в с к и й Д. С., О повышении рабочей частоты силовых конденсаторов переменного тока до 100—200 гц, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1965, № 3, 31—35.

К у ч и н с к и й Г. С., Л ы с а к о в с к и й Г. Г., Частичные разряды и срок службы бумажномасляной конденсаторной изоляции, Изв. ЛЭТИ, 1966, вып. 57, ч. 2, 186—199.

В а р ш а в с к и й Д. С., К а л а н т а р Н. Г., Влияние частоты переменного тока на поведение бумажномасляной изоляции при ускоренных испытаниях, «Электричество», 1967, № 7, 70—72.

К у з ь м и н а В. С., Р е н н е В. Т., Т о л в и н с к а я А. В., Я к о в л е в а Р. М., Исследование пропитанных эпоксидной смолой конденсаторов фирмы «Тесла» (ЧССР), Тр. ЛПИ, 1967, № 276, 162—169.

Л ы с к о в Ю. И., Конденсаторы мощностью 400 квар в США, «Энергохозяйство за рубежом», 1967, № 2, 35—36.

Р е н н е В. Т., А к о п я н В. А., Конденсаторы для устройства люминесцентного освещения, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1967, № 12, 120—123.

N e h e n k a m p T., The life of ballast for gas-discharging lamps: Capacitors, «Philips Technical Review», 1958/1959, 20, № 6, 162—169.

G a u s s e n s P., La production de l'énergie reactive a l'aide des condensateurs sur les reseaux de distrubition, «BSFE», 1959, IX, № 107, 686—693.

N e u m a n H., S m o l k a J., Der Einfluss der Glimmfestigkeit auf die Bemessung des Kondensatordielektrikums, «Elektrie», 1959, № 6, 212—218.

P i t t s J. P., The reliability and life of impregnated paper capacitors, «Pr. IEE», 1959, Pt. A., 106, № 29, 397—408.

R y š a v ý A., Silnoproudé kondensátory a bezpečnost, «Elektrotechnik» (CSSR), 1959, 14, № 9, 278—280.

- Schmidt A., Retting C. E., Gauper H. A., Capacitors in power systems with rectifier loads, «Direct Current», 1959, 4, № 4, 116—119.
- Soulaige G., Evolution dans la technique des condensateurs, «BSFE», 1959, IX, № 104, 449—461.
- Stibor J., Normalisace typů a rozměrů kondensátorů s papírovým dielektrikem, «Slaboproud. Obzor», 1959, 20, № 12, 791—792.
- Held W., Wenzel K., Dielektrische Verluste durch Ionenleitung im geschichtete Dielektrikum, «ETZ—A», 1960, 81, № 4, 121—127.
- Hochhäusler P., Lebensdauer Verlängerung von Wechselspannungs—Kondensatoren, «ETZ—B», 1960, 12, № 12, 292—294.
- Ruser R., Wolfert P., Experimental 100 000 joules capacitor bank for plasma research, «El-nics», 1960 33, № 32, 58—61.
- Strojny J., Kondensatory elektroenergetyczne napowietrzne, «Wiadom. Elektrotechn.», 1960, 20, № 5, 126—128.
- Bibliography on power capacitors, 1956—1959, «Power App. and Syst.», 1961, № 53, 31—36.
- Bretschneider R., Duroplast liliput Kondensatoren für die Transistor Technik, «NT», 1961, 11, № 6, 273—275.
- Boyer P., Papier Kondensatoren imprägniert mit stabilisierten chlorierten Dielektrika, «BSEV», 1961, 52, № 20, 801—804.
- Held W., Kunze R. C., Glimmenladungen und Lebensdauer von Starkstrom Kondensatoren, «ETZ—A», 1961, 82, № 11, 333—335.
- Jennings H. K., Charging large capacitor banks in thermonuclear research, «El. Engng.», 1961, 80, № 6, 419—422.
- Neumann H., Smolka J., Gesichtspunkte für die Konstruktion und die Herstellung von Blindleistung Kondensatoren, «Elektrie», 1961, № 12, 407—411.
- Zajic V., Panek P., Wylaczenie baterii kondensatorow wylacznikami wysokiego napięcia, «Prz. Elt.», 1961, 37, № 5, 193—198.
- Arndt H., Probleme bei wickel von Kondensatoren, «Elektrie», 1962, № 2, 9—11.
- Bercu A., Seria unitara de condensatoare de forta de joasa si medie tensiune, «Electrotechnica», 1962, 10, № 10, 383—390.
- Gaussens P., Bouvier G., Dutournier G., Fournie H., Zanochetti D., The behaviour of capacitors under thermal stresses, «CIGRE», 1962, p. 160.
- Held W., Gerstenkorn A., Leistung Kondensatoren für Mittel — Niederspannung, «SZ», 1962, 36, № 4, 338—339.
- Held W., Fortschritte beim Bau von Leistungs Kondensatoren, «ETZ—A», 1962, 83, № 9, 307—311.
- Krasucki Z., Church H. F., Garton C. C., Factors controlling the life of power capacitors, «CIGRE», 1962, p. 138.
- Liebscher F., Kondensatoren, «ETZ—A», 1962, 83, № 17, 556—557.
- Nartowski Z., Najnowsze osiągnięcia w produkcji kondensatorów do kompensacji mocy biernej, «Prz. Elt.», 1962, 38, № 9, 399.
- Petrick P., Kurzprüfungen und Dauerverhalten von Kondensatoren, «RM», 1962, 28, № 3, 206—209.
- Renne V. T., Recent developments of paper capacitors in USSR, «Pr. IEE», 1962, 109, № 22, 508—513.
- Riaux E., Petz L., Relations entre les caracteristiques d'un condensateur au papier impregné et celles de ces constitutions, «RGE», 1962, 71, № 11, 487—489.
- Jasicki Z., Zagadnienia kondensatorów elektroenergetycznych (MKWSE), «Prz. Elt.», 1963, 39, № 1, 32—37.
- Tomah A., Iamauti I., Askarel-filled capacitors for power factor correction, «National Technical Reports» (Japan), 1963, 9, № 6, 569—586.
- Vail A. G., Dielectrics for DC and energy storage capacitors, «El. Ins. Conf. M. and A.», 1963, 134—138.

Yamauchi I., Tomago A., Corona starting voltage level in chlodyphenil capacitors, «Electrotechnical Journal» (Japan), 1963, 8, № 3—4, 103—108 (PЖЭ, 1966, 6Б136).

Bibliography on power capacitors, 1959—1962, «IEEE Tr. Power App. and Systems», 1964, 83, 11, 1110—1116.

Medowski J., Kondensatory papierowe impregnowane żywicą epoksydowa, «Prace Inst. Tele- i Radiotechn.», 1964, 8, № 1, 61—72.

Procopec J., Kompenzační kondenzátory v praxi, «Elektrotechnik» (CSSR), 1964, 19, № 3, 71—73.

Raabe H., Leitungskondensatoren, «ETZ—B», 1964, 16, № 13, 359.

Pinkofsky W., Formgebung von Leistungs Kondensatoren, «Elektr. Anzeiger», 1964, 17, № 7, 87—89.

Skogby P., Capacitor discharging, and switching problem, «ASEA J.», 1964, 37, № 1, 15—18.

Smith D. M., Progress in North America capacitor design since 1955, «Electrical News — Engng», 1964, 73, № 8, 52—53 (PЖЭ, 1965, 3Б1180).

Szczepański Z., Wyladowania niezupełne ako przyczyna starzenia dielektryku elektrycznych kondensatorów wysokonapięciowych, «Rozpr. Elektrotechn.», 1964, 10, № 3, 383—426 (PЖЭ, 1965, 7Б113).

Wenzel K., Eigenschaften und Anwendung des Askarelkondensators als Starkstromkondensatoren zur Verbesserung des Leistungsfaktors, «El. und M.», 1964, 81, № 4, 77—79 (PЖЭ, 1964, 11Б156).

Bourdon R., Progrés récent dans la fabrication de condensateurs de puissance, «RGE», 1965, 74, № 12, 1037—1046 (PЖЭ, 1966, 6Б132).

Gutman G., Langner H., Karazitätskonstante Leistungs Kondensatoren, «SZ», 1965, 39, № 3, 164—168 (PЖЭ, 1965, 11Б115).

Robinson W. M., Paper capacitors, «El. W.», 1965, 74, № 1, 45—48, (PЖЭ, 1965, 1Б105).

Siciński Z., Modzyński A., Skrócenie czasu suszenia i nasywania kondensatorów energetycznych, «Prz. Elt.», 1965, XLI, № 9, 344—349.

Pole-type power capacitor (Magnawar), «Transmission and Distribution», 1965, 17, № 12, 52.

Boyer P., Praehauser T., Ageing of industrial capacitors, «CIGRE», 1966, p. 120 (PЖЭ, 1966, 11Б78).

Christ M., Ionizációs mérés hazai fűtőjavitékondenzátorokon, «Elektrotechnika» (Белгепск.), 1966, 59, № 1—2, 15—20 (PЖЭ, 1966, 11Б72).

Jasicki Z., Influence of daily variations of power system voltage and of harmonics on the process of ageing of capacitors, «CIGRE», 1966, p. 106 (PЖЭ, 11Б76).

Nordell R., Häglund K., Wtetemark S., Progress in the design and manufacture of series capacitors, «CIGRE», 1966, p. 141 (PЖЭ, 1966, 11Б75).

Petrick P., Papier Kondensatoren mit Imprägnierung aus chlorierte Naphtalinen, «RM», 1966, 32, № 3, 205—207 (PЖЭ, 1966, 8Б48).

Szczepański Z., Zjawiska jonizacyjne w kondensatorach impulsowych, «Prz. Elt.», 1966, XLIII, № 10, 404—406.

Zalewski J., Materiały i technologia kondensatorów impulsowych, «Prz. Elt.», 1966, XLIII, № 10, 406—409.

Szczepański Z., Wpływ biegunowości napięcia na intensywność starzenia dielektryku kondensatora impulsowego, «Prz. Elt.», 1966, XLIII, № 3, 94—97.

Stögbauer R., Glimmverhalten von Starkstrom — Kondensatoren, «Roederstein Kondensator-und Widerstandstechn.», 1967, № 13, 103—112.

Power capacitors in production, «Electr. Review», 1967, 181, № 14, 502—503.

Cuttino W. H., O'Neil J. E., Pyle A. B., Series capacitors for EHV transmission lines, «Westinghouse Eng.», 1967, 27, № 1, 12—18.

Fournié R., Thirrot A., Contribution à l'étude du vieillissement des condensateurs de puissance, «Bull. Direct. études et resh.», 1967, B, № 1, 101—115.

P r a e h a u s e r T., Zjawiska jonizacji i starzenia w kondensatorach impulsowych o izolacji papierowej impregnowanej olejem mineralnym, «Prz. Elt.», 1967, 43, № 4, 137—140.

New SLIMWAR 300 kvar capacitors, «Electr. India», 1967, 7, № 3, 34 (РЖЭ, 1967, 12Б106).

Металлобумажные конденсаторы

Р е н н е В. Т., Силовые металлобумажные конденсаторы, «Электричество», 1959, № 8, 73—77.

Л о п у х и н В. А., Контактный способ контроля толщины металлического покрытия на конденсаторной бумаге, «Измерит. техн.», 1966, № 1, 91—92.

Л я л и н а И. П., Пути уменьшения удельного объема и веса высоковольтных импульсных конденсаторов, Изв. ЛЭТИ, 1966, вып. 57, ч. 2, 161—173.

S t r ä b H., Selbstheilende Metallpapierkondensatoren für Wechselspannung, «E. u. M.», 1959, 76, № 5, 103—108.

Neuen Spannungen bei MP — Kondensatoren, «Elektronik», 1960, 9, № 7, 224.

H e y w a n g H., P r e i s s i n g e r H., Zählung Selbstheilender Durchschlag in Metallpapier — Kondensatoren, «SZ», 1961, 35, № 6, 439—499.

S t r ä b H., Praktische Erfahrungen über die Zuverlässigkeit von MP-Kondensatoren, «Nachrichtentechnisch. Fachberichte», 1961, 24, 103—114 (РЖЭ, 1963, 2Б96).

E i l o a r d T., Metallized capacitors, «El. Industr. Export», 1962, 62, № 6, 43—45.

H o f e r E., Metallpapier — Kondensatoren und ihre Anwendung, «Elektr. Ver.», 1963, 37, № 3—4, 65—67.

N e w A. A., L y n c h A. C., The failure of metallized-paper capacitors used with large series resistances, «Pr. IEE», 1962, 109, № 22, 496—499.

A c k m a n n W., Zeitraffende Zúverlässigkeitsuntersuchungen an zweilagigen Metallpapier — Kondensatoren, «NTZ», 1963, 16, № 10, 513—516 (ref. «BASE», 1964, 55, № 4, 178).

H u r a u x C., Les condensateurs au papier metallisé, «RGE», 1963, 72, № 11, 535—550.

H e y w a n g H., P r e s s i n g e r P., MP-Impulskondensatoren mit kleinen Selbstinduktivität, «SZ», 1964, 38, № 5, 376—380.

H e y w a n g H., P r e i s s i n g e r H., Verteilung des elektrischen Feldes in Kondensatoren mit metallisierten Dielektriken, «Freq.», 1965, 19, № 7, 242—246 (РЖЭ, 1966, 1Б49).

S c h o t t L., Der Metallpapier — Kondensator. Eine neue Spezialausführung für Umgebungstemperaturen bis 100° C mit Überlastungsschutz, «Elektromeister», 1966, 19, № 22, 1409—1410.

A c k m a n n W., Zum Driftverhalten von Metallpapierkondensatoren bei Beanspruchung mit Gleichspannung, «SEL—Nachr.», 1967, 15, 2, 82—84.

L e d a L., Badanie samoregeneracji izolacji w zwijkowych kondensatorach metalizowanych, «Prace Inst. Tele-i Radioteczniczn.», 1967, № 3, 3—19.

Пленочные и тонкопленочные конденсаторы

Р е н н е В. Т., Новый тип малогабаритного конденсатора — металлолаковый, «Электричество», 1960, № 4, 77—80.

К у ч и н с к и й Г. С., Малоиндуктивный импульсный конденсатор с малыми потерями в разрядном режиме, «Электричество», 1964, № 7, 39—42.

Новый тонкопленочный конденсатор, «Радиоэлектрон. за рубежом.», 1964, № 5, 15—16.

Пленочные конденсаторы, «Радиоэлектрон. за рубежом.», 1965, № 18, 20.

П р о з о р о в с к и й В. Е., А ф а н а с ь е в К. А., Влияние сопротивления обкладок на частотные свойства пленочных конденсаторов, «Радиотехника», 1965, 20, № 11, 69—74.

Л и т в и н о в а Е. Л. Импульсные малоиндуктивные пленочные конденсаторы высокой добротности, Труды ЛПИ, 1967, № 276, 169—178.

C o z e n s J. H., Developments of plastic dielectric capacitors, «IRE Tr. Comp. P.», 1959, 6, № 2, 114—118.

D e l l a G i o v a n n a C., Nuovi condensatori per apparecchiatura elettroniche, «L'Elettrotecnica», 1959, XLVI, № 8, 598—599.

Der ML-Kondensator — ein weiteres Bauteil für elektronische Geräte, «Elektronik», 1959, 8, № 4, 121.

Improved capacitors, «El-nics», 1960, 33, № 16, 86.

L u n c h i c k A., Paper and plastic capacitors, «El-nics», 1960, 33, № 13, 78.

U t r y c h M., Kondensatory ML, «Sdelov. Techn.» (ČSSR), 1960, № 7, 268—269.

W e h e H. C., W e r n e r J. K., A miniature laquer-film capacitor, «Bell lab. Record», 1960, 38, № 1, 19—22.

C h r o b a k P., Wrstwy dielektryczne z tworzyw sztucznych w zastosowaniu do wyrobu kondensatorów, «Prace Inst. Tele-i Radiotechn.», 1961, 5, № 4, 61—67.

T u r n e r L. W., Thin polymer films for use as dielectrics, «J. British IRE», 1961, 21, № 3, 241—249.

B o z z i n i C. A., B a y a r d C. P., Polystyrene medium frequency power capacitors, «El. Insulat. Conference», 1962, 141—144 (РЖЭ, 1963, 7Б108).

C h a r l t o n C. B., S h e n T. E., Plastic film dielectric capacitors, «Pr. IEE», 1962, 19, № 22, 476—487.

G i r l i n g D. S., S m i t h E. E., The coated foil capacitor, «Pr. IEE», 1962, 109, № 22, 500—503.

K e r p á n I., T o t h G., A lágmedveség hatása a polistirolkondenzátorok kapacitására, «Hiradástechika», 1962, 13, № 5, 186—197.

M i k i ć M., Mogućnost zamena papirnih kondenzatora kondenzatorima od sintetičkih folija, «Tehnika» (юрослав), 1962, 18, № 2, 31—36 (РЖЭ, 1963, 9Б74).

Selbstheilende Metall-Lack Kondensatoren, «NTZ», 1962, № 4, 196.

S c h i l l H., Neue Entwicklung an Dünnschichtkondensatoren, «VDE Fachberichte», 1962, 22, 1—5; «NTZ», 1962, 15, 549—553.

S t r o s c h H., Kondensatoren mit einem polyester Dielektrikum, «SEL-Nachrichten», 1962, 10, № 1, 30—32; «RM», 1963, 29, № 11, 930—931.

H e n n i g e r P., Über die Entwicklung eines regenerierende verlustarme Dünnschicht-Kondensator auf Polystyrol — basis, «Freq.», 1963, 17, № 9, 319—328.

P e s t e l T. L., Plastic dielectric in capacitors, «El. Ind.», 1963, 22, № 6, 21, 23—24.

Polycarbonatfolien Kondensatoren, «RM», 1963, 29, № 10, 861.

P r o t o s p a t o r e F., Prove di vito su condensatori in Moplefan, «Materiali Plastiche ed Elastomeri», 1963, 29, № 9, 1153—1159.

S t u a r t M., Dielectric properties of cross linked polystyrene films, formed in the glow discharge, «Nature», 1963, 199, № 1888, 59—60 (РЖЭ, 1964, 11Б114).

W e h e H. G., M c M a h o n W., Developments in metallized polycarbonate capacitors, «El. Insul. Conference», 1963, 7—9 (РЖЭ, 1965, 11Б117).

W i e g a n d O., Kunststoffkondensatoren, «SZ», 1963, 37, № 4, 339—341.

A c k m a n n W., Zur Kapazitätskonstanz von ungeschützten Styroflex-Kondensatoren, «Intern. Elektr. Rundschau», 1964, 18, № 6, 322—329.

A d e l s o n L., R i c e H. L., Polycarbonate-foil capacitors, «Pr. El. Components Conference», 1963, 44—50 (РЖЭ, 1965, 4Б77).

L e d a L., Kondensatory metalowolakierowa, «Prz. Eln.», 1964, 5, № 2, 93—96.

M c M a h o n W., Wehe H. G., Developments in metallized polycarbonate capacitors, «Insulation» (USA), 1964, 10, № 11, 28—32 (РЖЭ, 1965, 7Б116).

New metallized polycarbonate capacitor is small and selfhealing, «Bell Labor. Record», 1963, 41, № 9, 353.

Perkowski Z., Zagadnienie stratności kondensatorów swijkowych, «Biulet. Kablowy», 1964, 8, № 4, 80—93 (РЖЭ, 1965, 4Б65).

Schmidt D. F., Performance and reliability of rapped and potted mylar capacitors, «Pr. El. Component Conference», 1963, 142—149.

Valley D. J., Wagener J. S., ML-I capacitors — a new miniaturized type of plastic film capacitor, «IEEE Tr. Comp. P.», 1964, CP—11, № 2, 205—211 (РЖЭ, 1965, 1Б127).

Lamphier W. C., Plastic-film capacitors, «El. W.», 1965, 74, № 1, 42—44.

Polystyrene capacitors, «Electronic Weekley», 1965, № 258, 5 (РЖЭ, 1966, 2Б114).

Mc Elroy P. K., A 100 microfarad decade capacitor, «General Radio Experimenter», 1965, 39, № 7, 10—12 (РЖЭ, 1965, 3Б115).

Toro J. A., Brown D. R., A capacitor designed for automatic production, «Bell Labor. Record», 1965, 43, № 2, 47—52.

Cóblós J., Poliéster kondenzátorok, «Hiradástéchn.», 1966, 17, № 6, 176—180.

Götz E., Präzisions-Kondensatoren, «Roederstein», 1966, № 12, 35—38.

Hacker J., Polycarbonate Folien Kondensatoren, «Roederstein», 1966, № 12, 21—28.

Lamphier W. C., Precision in polystyrene capacitors, «Electron. Capability», 1966, 4, № 1, 54—55 (РЖЭ, 1966, 12Б197).

Sickmueller W., Sunde J. A., Polycarbonate capacitors, «Design Electron.», 1966, 3, № 5, 26—29.

Kirschner U., Regenerierende Kunststoff — Kondensatoren, «Fernmelde Praxis», 1967, 44, № 3, 113—128.

Kang B. P., Plastic films for Highstress capacitors and cables, «Insulation», 1967, 13, № 6, 30—32.

Giannini Mochi E., Zanoletti D., Isotactic polypropylene film for new power capacitors, «CIGRE — CE 18,» 1967/67/2.

Hacker H., Polycarbonate Folienkondensatoren, «Radio Mentor», 1967, 33, № 5, 365—367 (РЖЭ, 1967, 12Б113).

К главе тринадцатой

Тареев Б. М., Лернер М. М. Непрерывное оксидирование переменным током анодной фольги для электролитических конденсаторов, «Электричество», 1959, № 6, 71.

Тареев Б. М., Лернер М. М., Исследование процесса формовки алюминиевой фольги для электролитических конденсаторов на трехфазном переменном токе промышленной частоты, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1959, № 5, 36.

Лернер М. М., Производительность агрегата непрерывного оксидирования алюминиевой фольги для электролитических конденсаторов, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1960, № 3.

Грачева Г. М., Закгейм Л. Н., Сафонов В. Ф., Электролитические конденсаторы для установок импульсного освещения, «Успехи научной фотографии», 1959, т. VI, 72—74.

Тареев Б. М., Лернер М. М., К теории односторонней проводимости оксидной пленки на алюминии, «Физика тв. тела», 1960, № 10, 2487—2491.

Богоявленский А. Ф., Александров Я. И., К вопросу об ультрамикроскопическом исследовании прианодного слоя электролита при электрохимическом окислении алюминия, Изв. ВУЗ, «Химия и хим. технол.», 1960, № 6, 1062—1066.

Грибков С. П., Маркова Н. Е., Исследование конденсаторной алюминиевой фольги, Тр. Воронеж. ун-та, 1961, т. 55, 5—10.

Тареев Б. М., Лернер М. М., Пути развития алюминиевых электролитических конденсаторов за рубежом, «Электричество», 1961, № 5, 81—84.

Т в о р о г о в Н. И., О методе получения диэлектрических пленок на алюминии, «Журн. прикл. химии», 1961, 34, № 10, 2203—2206.

Л е р н е р М. М., О несимметричных системах формовки анодной фольги переменным током, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1962, № 9, 35—42.

М а р т ы н ю к Г. А., Л у к о в ц е в П. Д., Исследование механизма выпрямляющего действия твердых электролитических конденсаторов, «Журн. физ. химии», 1962, 36, № 11, 2340—2346.

О д ы н е ц Л. Л., Об эффективности формовки переменным током анодной фольги в производстве электролитических конденсаторов. Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1962, № 2, 108—111.

О д ы н е ц Л. Л. и др., Анодное окисление кремния в чистой воде, «Журн. физ. химии», 1962, 36, № 10, 2199—2204.

П а н о в А. А., Формовка алюминиевой фольги в чистой воде для анодов электролитических конденсаторов, Изв. ВУЗ, «Энергетика», 1963, № 4, 48—54.

К а р а н д е е в К. Б., Г р и н е в и ч Ф. Б., Ш у л ь ц В. П., Об одной схеме автоматического нормирования секций электролитических фольговых конденсаторов; в сб. «Автом. контроль и методы эл. измер.», Сиб. отд. АН СССР, 1962, 55—60.

Л е р н е р М. М., Конденсаторы на основе оксидной изоляции; в сб. «Итоги науки и техн. за 1962—1963 гг.», 1964, 95—146.

Т р а х т е н б е р г А. Р., Ф а р ы н с к и й Р. М., Малогабаритные электролитические конденсаторы, «Радио», 1964, № 10, 59—60.

Б а к л а н о в Ю. И. и др., Автоматическая линия для изготовления секций электролитических конденсаторов; в сб. «Автомат. контроль и методы эл. изм.», 1964, т. 2, 126—130.

Х о м ы л е в А. Ф., Электролитические конденсаторы с алюминиевым анодом и полупроводниковым катодом, Изв. ЛЭТИ, 1966, вып. 57, ч. 2, 146—154.

A r i e s R., Tantalum capacitors with solid electrolyte, «El. Engng», 1959, 31, № 374, 230—231, 254.

B e r r y R. W., S l o a n D. J., Tantalum printed capacitors, «Pr. IRE», 1959, 47, № 6, 1070—1075.

K a t o n a J., Methods for increasing the specific capacity of electrolytic capacitors, «Act. Techn. Acad. Sc. Hungariacae», 1959, XXIV, № 3—4, 235—271.

N g u y e n T h i e n - C h i, Les condensateurs électrolytiques au tantal á électrolyte solide, «Onde El.», 1959, 39, № 383, 125.

M o r i o k i S., U m e z o n e A., Titanium as anode material of electrolytic capacitor, «Journal of Japan Inst. of Metals», 1959, 23, № 5, 296—299.

W a g n e r M., Tantalkondensator mit festem Elektrolyten, «SEL — Nachrichten», 1959, 7, № 1, 38—40.

Y o u n g L., Kinetics of formation of anodic oxide film on zirconium, «Tr. F. Soc.», 1959, 55, № 2, 632—639.

A l l i s o n W. M., B u b r i c k i S. W., H a z z a r d H. D., Millard R. J., Symposium on tantalum capacitors, «IRE Tr. on Comp. P.», 1960, CD—7, № 3, 88—106.

D i d i n g e r G. H., Solid tantalum capacitors in timing circuits, «El. Ind.», 1960, 19, № 5, 110—113.

G i r l i n g D. S., E v a n s W. E., The development of special quality tantalum capacitors, «British Commun. and Electron.», 1963, 10, № 6, 438—441.

M a r t i n C. L., F i n c h a m C. J., C h o d s e y E. E., A study of the factors, affecting the electric characteristics of sintered tantalum anodes, «J. El. Ch. S.», 1960, 108c, № 4, 332—337.

M o s e l b a c h W., Tantalkondensatoren mit festem Elektrolyte und Sinteranode, «El. Rund.», 1960, 14, № 9, 371—373.

S t e f a n o v i ć V., A l e k s i ć A., Tantaloivi elektrolitski kondensatori, «Elektrotehnika» (Югослав.), 1960, 9, № 4, 89—90.

A c k m a n n W., Alterungskriterium bei Elektrolytkondensatoren, «Nachrichtentechnik Fachberichte», 1961, 24, 115—126 (РЖЭ, 1962, 2Б122).

B o r d e r s E., K o r n h a u s R., On the fundamental properties of etching of high purity aluminium foil for capacitor use, «J. El. Ch. S.» 1961, 108, № 8, 1960.

H a n d R. B., L i n g H. W., K o l s k i T., Electrical characteristics of anodized niobium foil and sintered pellets, «J. El. Ch. S.», 1961, 108, Novemb., 1023—1028.

H u b e r F., B l o x o n J., Titanium printed capacitors formicrominiaturisation, «IRE Tr. Comp. P.», 1961, VCP—8, № 2, 80—84.

M a g i n a L., O r m e J. E., Optical properties of anodic films on tantalum, «J. El. Ch. S.», 1961, 18, № 5, 428—438.

M o h l e r D., H i r s t R., Dielectric characteristics of tantalum anodic films as related to film structure, «J. El. Ch. S.», 1961, 108, № 4, 347—351.

S c h w a r t z N., G r e s c h M., K a r l i k S., Niobium solid electrolytic capacitors, «J. El. Ch. S.», 1961, 108, № 8, 750—758.

B a k i s h R. and al., Fundamentals of etching highpurity aluminium foil for capacitor use, «J. E. Ch. S.», 1962, 109, № 9, 791—795.

C h u r c h H. F., The dielectric properties of anodic aluminium oxide films, «Pr. IEE», 1962, 109, № 22, 399—406 (PЖЭ, 1962, 21Б100).

F r a n k l i n R. W., Electrolytic capacitors, «Pr. IEE», 1962, 109, № 22, 525—536 (PЖЭ, 1962, 22Б79).

H a l l J. H., Reliability of tantalum capacitors increased, «El-nics», 1962, 35, № 37, 78—80 (PЖЭ, 1963, 4Б121).

K l e e f s t r a M., V e r g n o l l e J., Condensateurs électrolytiques au niobium», Annales Radioélectriques», 1962, 17, № 69, 188—193, 255. (PЖЭ, 1963, 6Б142).

L i n g H. W., K o l s k i T. L., Niobium solid electrolytic capacitors, «J. El. Ch. S.», 1962, 109, № 1, 69—70.

W i e g a n d O., Tantal Elektrolytkondensatoren für erhöhte Anforderung, «SZ», 1962, № 4, 352—359.

B o n n e S., V o e t e n H., H e n d r i k s H., An aluminium solid electrolytic capacitor, «IEEE Tr. Comp. P.», 1963, 10, № 1, 3—9.

B o o n e S., B ü g e R. D., Das CZ-product, eine neue Kennzeichnung für das Temperatur- und Frequenzverhalten von Elektrolyt-Kondensatoren, «BSEV», 1963, 54, № 9, 313—322.

G i r l i n g D. S., E v a n s W. E., The development of special quality tantalum capacitors, «British Commun. and Electronics», 1963, 10, № 6, 438—441.

H a g i w a r a H., Y a m a s h i t a A., Characteristics of titanium electrolytic capacitors, «Pr. IEEE», 1963, 51, № 10, 1320—1327.

H a h n G., Zur Frage der Stabilität von Elektrolyt — Kondensatoren mit flüssigen und festem Elektrolyten, «NT», 1963, 13, № 11, 426—428.

M a s i n g L., V i t i n g J., Y o u n g L., Dielectric properties of films on tantalum with metal counter electrode «Dielectrics», 1963, 1, № 1, 45—51.

M e n n e r i c h W., Über den Verhalten von Tantal — Elektrolyt — Kondensatoren in breiten Frequenz — und Temperaturbereich, «SZ», 1963, 37, № 3, 175—178.

R e e s e M., Photoflash application of aluminium electrolytic capacitors, «EDN», 1963, 8, № 15, 102—104.

W a l k e r J. F., The frequency characteristics of electrolytic capacitors, «Radio and Electron. Components», 1963, 4, № 1, 25—28.

B a u m l e i n G., D e g e n h a r t V., D o l e r D., Der Einfluss des Papiers auf das Hochfrequenzverhalten von Elektrolytkondensatoren, «ETZ—A», 1964, 85, № 26, 874—844.

D i d i n g e r G. H., Tantalum capacitors accelerated life testing, «Evaluation Engineering», 1964, 3, № 5, 6—8, 10 (PЖЭ, 1965, 4Б80).

J e n n y A., Foil type solid electrolytic capacitor, «IEEE Tr. Comp. P.», 1964, 11, № 2, 182—186.

L e h o v e c K., S l o b o b o d s k o y A., Impedance of semiconductor-insulator-metal capacitors, «Solid-state Electronics», 1964, 17, № 1, 59.

- Vergnolle J., Distribution network analysis of porous electrode capacitors, «J. El. Ch. S.», 1964, 3, № 7, 799—804.
- Warner M., Zum Problem der Niobkondensatoren, «RM», 1964, 30, № 3, 201—204.
- Ackmann W., Charakteristiken von Tantalkondensatoren, «ETZ—A», 1965, 86, № 19, 632—635.
- Alwitt R. S., Hills R. G., The chemistry of failure of aluminium electrolytic capacitors, «IEEE Tr., P. Mat. Pack.», 1965, 1, № 2, 28—36 (PЖЭ, 1966, 6Б177).
- Burnham J., A new approach to attainment of the highest possible reliability in tantalum capacitors, «IRE Tr. Comp. P.», 1965, 12, № 1, 21—29.
- Burger F. J., Chaseldine D. M., Moresi J. A., New high performance aluminium electrolytic capacitors, «IEEE Tr. P. Mat. Pack.», 1965, 1, № 1, 210—216 (PЖЭ, 1966, 3Б115).
- Cane O., Analisi dei processi tecnologici attualmente usati per la produzione dei condensatori al tantalio ad elettrolito solido, «Industr. Italiana Elettrotechn. ed. Elettron.», 1965, 18, № 6, 437—442.
- Dreiner R., Lehovc K., Schimmel J., Growth mechanism of the anode film on tantalum, «J. El. Ch. S.», 1965, 112, № 4, 395—401.
- Kahn L., The life of electrolytic capacitors, «Electrotechnology» (USA), 1965, 76, № 2, 48—49.
- Schwartz N., Gresh M., Effect of ambients and contact area on the asymmetric conductivity of anodic tantalum oxide films, «J. El. Ch. S.», 1965, 112, № 3, 295—300.
- Thiel E., Der Scheinwiderstand von metallisierten und elektrolytischen Kondensatoren, «RM», 1965, 31, № 4, 280—290.
- Vavrouch D., Rubeš M., Vnitřní odpory kondenzátorů a výbojek pro kvantové generatory světla, «Slaboproudý Obzor» (CSSR), 1965, 26, № 4, 236—238.
- Vergnolle J., Vues nouvelles sur les condensateurs électrolytiques, «Technique Moderne», 1965, 57, № 2, 56—62.
- Vergnolle J., Condensateurs au tantale a forte charge et a haute tension, «L'Onde El.», 1965, 45, № 452, 1093—1102.
- Bakish R., Meier F. G., Aluminium in the capacitor industry, «Insulation» (USA), 1966, 12, № 10, 30—36.
- Bubeníček M., Vliv kyslíčnicku křmičitého na tvorbu dielektrické vrstvy u hliníkových elektrolytických kondenzátorů, «Slaboproudý Obzor», 1966, № 2, 68—70.
- Figuziński Z., Kondensatory elektrolityczne w trakcji elektrycznej, «Prz. Elt.», 1966, XIV, № 4, 158—161.
- Kover F., Musselin M. J., Influence de l'électrolyte de formation sur la structure et sur les propriétés des couches d'oxydes anodiques. «RGE», 1967, 76, № 5, 793—799, Disc. 823—826.
- Bruh G., Zusammenhänge zwischen Bauweise und Qualität von Aluminium — Elektrolytkondensatoren, «Radio Mentor», 1967, 33, № 3, 184—186.
- Sage M. C., Condensateurs électrolytiques solides à l'aluminium, «Electronique», 1967, № 69, 109—114.
- Sage M. C., Mullard solid aluminium electrolytic capacitors, «Mullard Techn. Commun.», 1967, 9, № 65, 106—110 (PЖЭ, 1967, 10Б166).
- Haselman I., Harkness E. H., Tantalkondensatoren mit festem Elektrolyt, «Funk Techn.», 1967, 22, № 1, 14—16, 58 (PЖЭ, 1967, 6Б1130).
- Moore T. W., Interpreting X-rays of solid tantalum capacitors, «Evaluat. Engng», 1966, 15, № 36, 47, 50, 58 (PЖЭ, 1967, 6Б117).
- Ho R. K., Solid electrolytic tantalum capacitors — index of quality, «Insulation» (USA), 1967, 13, № 3, 69—73 (PЖЭ, 1967, 10Б168).
- Burnham J., The variation of the conductivity of Ta_2O_5 in electrolytic capacitors, «IEEE Tr. P. Mat. Pack.», 1966, 2, № 4, 114—115 (PЖЭ, 1967, 9Б76).

Souza E., Wallace K., Jackson S. P., Power control to form capacitors, «Joint Automat. Control Conf., Seattle Wash. 1966, Preprints conf. papers», S. I., 237—242 (РЖЭ, 1967, 9Б77).

Tantalum capacitors described, «Electron. News», 1967, 12, № 599, 44 (РЖЭ, 1967, 11Б60).

Moore T. W., Tempel J. L., A new spec for tantalum capacitors, «Electron. Procurement», 1967, 7, № 6, 46—47 (РЖЭ, 1967, 1Б139).

Buice J. B., Bridgers R. K., Jenny A. L., 150 and 250 Vdc foil type solid electrolyte tantalum capacitors, «Proc. El. Comp. Conf. USA, 1966, IEEE», 1966, 335—341 (РЖЭ, 1968, 1Б140).

Shtasel A., Papadopoulos G., Electrolytless tantalum foil capacitors «IEEE2, 1966, 342—347 (РЖЭ, 1968, 1Б141).

Klerer J., Orr W., Farrell D., The effect of moisture upon tantalum oxide thinfilm capacitors, «IEEE, 1966, 348—360 (РЖЭ, 1968, 1Б142).

Burnham J., A new property of etched niobium wet electrolytic capacitors, «IEEE Tr. P. Mat. Pack.», 1967, 3, № 1, 21—25 (РЖЭ, 1967, 12Б135).

К главе четырнадцатой

Коровин Р., Малогабаритные конденсаторы переменной емкости, «Радио», 1959, № 8, 43—47.

Грохольский А. Л., Дисковый образцовый конденсатор полу-переменной емкости для частот до 200 Мгц, «Измерит. техн.», 1961, № 3, 552—553.

Turnbull A. A., Precision variable capacitors, «Philips Technical Review», 1959, 20, № 8, 234—241.

Heller I., Projectarea si tehnologia de fabricatia a condensatoarelor variabile, «Telecommunicati» (Румын.), 1959, 3, № 6, 273—277.

Selby M. C., Conical coaxial capacitors and their advantages, «JNBS», 1959, C6, № 2, 87—89.

Hay H. F., Precision difference capacitors for analog multiplication, «Control Engineering», 1960, VI, № 6, 139.

Klen B., Vakuový ladící kondenzátor, «Sdelovačy Techn.», 1960, № 10, 389.

High vacuum variable capacitors, «El. Engng», 1960, 32, № 386, 255.

Miniaturní otočný kondenzátor, «Sdelov. Techn.», 1960, № 8, 312.

Miniaturní kondenzátor, «Sdelov. Techn.», 1960, № 6, 233.

Montgaillard J., Etude d'un condensateur variable sous vide, «L'Onde El.», 1961, 41, № 408, 247—249.

New ceramic vacuum capacitors, «El-nics», 1961, 34, № 40, 68—90.

Variable Hochvakuum Kondensatoren, «Elektronik», 1961, 10, № 11, 349.

Wiesner W., Spezial Drehkondensator zur Messung sehr kleine Kapazitäten, «ETZ-A», 1961, 82, № 19, 606—609.

Yamamoto Y., A helix type variable capacitor, «Pr. IRE», 1961, 49, № 2, 521—523.

New design of piston trimmer capacitor, «El-nics», 1962, 85, № 31, 31.

Simsek J., Trimmer s proměnným teplotním součinitelem kapacity, «Sdelov. Techn.», 1962, № 9, 335—340.

Precision variable piston capacitor, «Missiles and Space», 1963, 11, № 2, 28—29.

Variable vacuum capacitors, «Radio and Electronic Components», 1963, 4, № 1, 47.

К главе пятнадцатой

Сегнетокерамические конденсаторы

Вербickaя Т. Н., Электрические свойства сегнетокерамики ВК-2, ВК-3, ВК-4 и варикондов и их применение, «Электричество», 1960, № 8, 68—76.

Некрасов М. М., Нелинейные конденсаторы на основе тройных сегнетоэлектрических систем, «Электричество», 1960, № 5, 76—79.

Butler T. W., Roberts G. A., Voltage-variable capacitor selection guide, «El-nics», 1959, 32, № 30, 52—54.

Herbert M., Martin R. G., The application of modern materials to electronic components, «J. British IRE», 1961, 21, № 2, 107—121.

Ryšanek V., Feroelektrika v elektronice, «Slabopr. Obzor», 1963, 24, № 7, 408—414.

Waddel B., Brown W., Wolter A., Voltage saturable capacitors, «El. Des.», 1963, 11, № 8, 50—55.

Ceracaps-erste condensator met spanning safhankeliske capaciteit, «Radio Electron.» (Голланд.), 1964, 12, № 11, 754—756.

Pokorný J., Djadkov S., Nelinearní stratový kondenzatory — Tandel, «Slabopr. Obzor», 1965, № 10, 607—614.

Cetin I., Kapazität von nichtlinearen Kondensators bei Gleich-Wechsel — und Mischspannung, «ETZ-A», 1965, 85, № 9, 266—272.

Полупроводниковые конденсаторы

Берман Л. С., Ландсман А. П., Субашиев В. К., Низкочастотные варикапы, «Радиотехника», 1959, 14, № 12, 69—70.

Василькевич И., Покровский Ф., Полупроводниковый диод — управляемый конденсатор, «Радио», 1961, № 11, 47—48.

Шестопалов А. М., Самойлов Н. В., Емкость варикапов, Изв. ВУЗ, «Радиотехника», 1962, № 6, 688—699.

Жарков А. В., Тонкие пленки двуокиси титана и поверхностные емкости на их основе. Тр. Моск. ин-та электрон. машиностр., 1966, вып. 2, 122—131.

Hammerslag J. C., Taking advantage of the voltage sensitivity of the silicon capacitor, «Electr. Manufacturing», 1959, 64, № 3, 172—177.

Mortensen K. E., Alloyed thin base diode capacitor for parametric amplifiers, «J. Appl. Phys.», 1959, 30, № 10, 1542—1548.

Frazier H. D., Hypersensitive voltage variable capacitor, «Semicond. Products», 1960, № 3, 56—59.

Halbleiter Kondensatoren, «Elektrotechn.», 1961, 43, № 17, 18.

Voltage variable capacitors, «Aerovox Research Worker», 1961, 31, № 7—9, № 10—11 (РЖЭ 1963, 4Б112).

Adams K. H., Storn E., A variable semiconductor capacitor, «El. Engng», 1962, 34, № 417, 733—735.

Oldřich B., Polovodičovi kondenzatory, «Sdelov. Techn.», 1962, 10, № 1, 4—7.

Taylor C. H., Semiconductor junction capacitors, «Wireless World», 1962, 68, № 4, 193—196.

Zandra W., Schrack E., Der Silicium Kondensator und seine Anwendung als regelbare Karazität, «Radio Sch.», 1962, 12, № 6, 218—220.

Barnes D. J., The uses of Zener-diodes as voltage controlled capacitors, «Journal of Scientific Instruments», 1963, 40, № 10, 510.

Ott A., Kennlinienschreiber für Kapazitätsdioden, «Elektronik», 1964, № 2, 45—47.

Schaffner G., Voltage-variable capacitor for electrical tuning, «El. Tech.», 1966, 78, № 2, 62—65.

Norwood M. H., Shatz E., Voltage variable capacitor tuning: a review, «Procc. IEEE», 1968, 56, № 5, 788—798.

СОКРАЩЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ИНОСТРАННЫХ ЖУРНАЛОВ

Arch. El.	— Archiv für Elektrotechnik.
ASEA J.	— Alg. Svenska El. Aktiebolag Journal.
BASE	— Bulletin de l'Assosation Suisse des Electriciens.
BSEV	— Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins.
BSFE	— Bulletin de la Societé Francaise des Électriciens.
CIGRE	— Conference Internationale des Grandes Reseaux Électriques.
El. Comp.	— Electronic Components.
El. Des.	— Electronic Design.
El. Dg.	— Electronic Digest.
El. Engng.	— Electronic Engineering.
El-nics	— Electronics.
El. Ind.	— Electronic Industries.
El. Eng. Des.	— Electronic Engineering Design.
El. W.	— Electronic World.
El. Com.	— Electrical Communication.
El. Ins. Conf. M. A.	— Electrical Insulation Conference: Materials and applications.
El. u. M.	— Elektrotechnik und Maschinenbau.
Elektr.	— Elektrotechniker.
Engng J.	— Engineering Journal.
El. Obz.	— Elektrotechnický Obzor.
Freq.	— Frequenz.
IRE Tr. P. Mat. Pack.	— Institution of Radio Engineers; Transactions on Parts, Materials and Packaging.
IEEE Tr. P. Mat, Pack.	— Institution of Electrical and Electronic Engineers; Transactions on Parts, Materials and Packaging.
IRE Tr. Comp. P.	— IRE Transactions on Components Parts.
IEEE Tr. Comp P.	— IEEE Transactions on Components Parts.
IRE Tr. Pr. T.	— IRE Transactions on Production Technics.
J. Appl. Phys.	— Journal of the Applied Physics.
J. El. Ch. S.	— Journal of Electrochemical Society.
JIEE	— Journal of the Institution of Electrical Engineers.
J. NBS	— Journal of Research of the National Bureau of Standards.
NTZ	— Nachrichtentechnik Zeitschrift.
NT	— Der Nachrichten Technik.
Onde El.	— L'Onde Electrique.
Pr. IEE	— Proceedings of the Institution of Electrical Engineers.
Pr. IRE	— Proceedings of the Institution of Radio Engineers
Prz. Eln.	— Przegląd Elektroniki.

Prz. Elt.
Prz. Tel.
RM
RGE
SZ
ETZ
Techn. Rund.
Tr. F. Soc.
WW

— Przegląd Elektrotechniczny.
— Przegląd Telekomunikacyjny.
— Radio Mentor.
— Revue Générale d'Électricité.
— Siemens Zeitschrift.
— Elektrotechnische Zeitschrift.
— Technische Rundschau.
— Transactions of Faraday Society.
— Wireless World.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
§ 1. Основная терминология и обозначения конденсаторов в схемах	5
§ 2. Краткие сведения об истории конденсаторов	7
§ 3. Современное состояние конденсаторостроения	10
§ 4. Основные области применения конденсаторов	12
§ 5. Классификация конденсаторов	13

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

Общие свойства и основы конструирования конденсаторов постоянной емкости

Глава первая. Емкость

§ 6. Основные формулы	15
§ 7. Отклонение емкости от номинала и подгонка емкости	21
§ 8. Поляризация диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость	24
§ 9. Зависимость емкости конденсаторов от температуры и от времени	31

Глава вторая. Конденсатор в цепи постоянного тока

§ 10. Зарядка конденсатора	35
§ 11. Сопротивление изоляции конденсатора и постоянная времени	38
§ 12. Разряд конденсатора при отсутствии индуктивности	43
§ 13. Явление саморазряда	44
§ 14. Коэффициент абсорбции конденсаторов	46

Глава третья. Конденсатор в цепи переменного тока

§ 15. Разряд конденсатора при наличии индуктивности	48
§ 16. Особенности прохождения переменного тока через конденсатор. Фильтровые и защитные конденсаторы	49
§ 17. Индуктивность конденсаторов и полное сопротивление	51
§ 18. Кажущаяся и реактивная мощность конденсатора. Включение конденсаторов в цепь переменного тока	56

§ 19. Зависимость емкости конденсатора от частоты и от величины приложенного напряжения	62
Глава четвертая. Обкладки конденсатора	
§ 20. Общие соображения	66
§ 21. Обкладки из фольги	68
§ 22. Металлизация диэлектрика	72
§ 23. Особенности обкладок, нанесенных металлизацией	84
Глава пятая. Потери энергии в конденсаторе	
§ 24. Общие сведения о потерях энергии	89
§ 25. Расчет величины потерь в конденсаторе при синусоидальном напряжении	90
§ 26. Угол потерь конденсатора	96
§ 27. Зависимость угла потерь конденсаторов от температуры и частоты	101
§ 28. Угол потерь двух конденсаторов при их параллельном или последовательном соединении	105
§ 29. Зависимость угла потерь конденсаторов от напряжения	107
§ 30. Расчет величины потерь в конденсаторах при несинусоидальном напряжении	111
Глава шестая. Электрическая прочность конденсаторов	
§ 31. Общие сведения о пробое диэлектриков	115
§ 32. Оценка электрической прочности конденсаторов	124
§ 33. Кратковременная электрическая прочность конденсаторов	127
§ 34. Тепловой пробой	134
§ 35. Ионизационный пробой	140
§ 36. Электрохимический пробой	156
§ 37. Длительная электрическая прочность	166
§ 38. Электрическая прочность конденсаторов при воздействии импульсного напряжения	174
§ 39. Пробой по закраине	177
§ 40. Оценка надежности конденсаторов	184
Глава седьмая. Внешние факторы, влияющие на работу конденсаторов	
§ 41. Общие сведения о рекомендации МЭК	194
§ 42. Влияние влажности на электрические свойства конденсаторов и методы защиты от действия влажности	197
§ 43. Влияние пониженного давления окружающей среды	216
§ 44. Влияние излучений	220
§ 45. Механические воздействия	226
Глава восьмая. Тепловые характеристики конденсаторов	
§ 46. Общие соображения	230
§ 47. Теплоотдача конденсаторов при естественном воздушном охлаждении	231
§ 48. Форсированное охлаждение конденсаторов	238
§ 49. Максимальная температура внутри конденсатора	243
§ 50. Конденсатор при неустановившемся тепловом режиме	247
Глава девятая. Удельные характеристики конденсаторов	
§ 51. Удельная емкость и удельный заряд	249
§ 52. Удельная энергия	252
§ 53. Удельная реактивная мощность	254
§ 54. Удельные характеристики конденсаторной секции	257
§ 55. Удельная стоимость конденсаторов	259

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

Основные сведения о конденсаторах постоянной емкости

Глава десятая. Конденсаторы с газообразным и жидким диэлектриком

§ 56. Общая характеристика конденсаторов с газообразным диэлектриком	262
§ 57. Воздушные конденсаторы постоянной емкости	263
§ 58. Образцовый воздушный конденсатор с точно вычисляемым значением емкости	269
§ 59. Газонаполненные конденсаторы	271
§ 60. Вакуумные конденсаторы	277
§ 61. Конденсаторы с жидким диэлектриком	281

Глава одиннадцатая. Конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком

§ 62. Общая характеристика	284
А. Слюдяные конденсаторы	
§ 63. Конденсаторная слюда	286
§ 64. Стабильность емкости слюдяных конденсаторов	293
§ 65. Слюдяные конденсаторы малой мощности	297
§ 66. Слюдяные конденсаторы большой мощности	305
§ 67. Слюдяные образцовые конденсаторы и магазины емкости	308
Б. Керамические конденсаторы	
§ 68. Керамические материалы, применяемые в конденсаторостроении	311
§ 69. Общие сведения о технологии керамических конденсаторов	316
§ 70. Керамические конденсаторы низкого напряжения	326
§ 71. Керамические конденсаторы высокого напряжения	332
В. Стекланные конденсаторы	
§ 72. Стекло как конденсаторный диэлектрик	338
§ 73. Стеклоэмалевые и стеклокерамические конденсаторы	341
Г. Тонкослойные конденсаторы с неорганическим диэлектриком	
§ 74. Общие сведения о тонкослойных конденсаторах	345

Глава двенадцатая. Конденсаторы с твердым органическим диэлектриком

§ 75. Общая характеристика	352
А. Бумажные конденсаторы	
§ 76. Конденсаторная бумага	356
§ 77. Пропиточные массы	372
§ 78. Технология изготовления бумажных конденсаторов	389
§ 79. Силовые бумажные конденсаторы	401
§ 80. Бумажные конденсаторы для электронной техники	410
§ 81. Металлобумажные конденсаторы	418
Б. Пленочные конденсаторы	
§ 82. Синтетические пленки, применяемые в конденсаторостроении	429
§ 83. Конденсаторы с диэлектриком из неполярных синтетических пленок	443
§ 84. Конденсаторы с диэлектриком из полярных синтетических пленок	451
§ 85. Тонкослойные конденсаторы с органическим диэлектриком	454
§ 86. Конденсаторы с комбинированным диэлектриком	459
	591

Глава тринадцатая. Электролитические (оксидные) конденсаторы

§ 87. Общая характеристика	464
§ 88. Алюминиевые электролитические конденсаторы	473
§ 89. Танталовые электролитические конденсаторы	493
§ 90. Ниобиевые и титановые конденсаторы	503
§ 91. Схема, эквивалентная электролитическому конденсатору	508

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

Конденсаторы переменной емкости

Глава четырнадцатая. Конденсаторы с механически управляемой емкостью

§ 92. Общая характеристика	513
§ 93. Законы изменения емкости с углом поворота в плоских многопластинчатых конденсаторах с вращательным движе- нием	516
§ 94. Воздушные конденсаторы переменной емкости	523
§ 95. Воздушные подстроечные конденсаторы	529
§ 96. Переменные конденсаторы с твердым диэлектриком	531
§ 97. Переменные конденсаторы высокого напряжения	537

Глава пятнадцатая. Конденсаторы с электрически управляемой емкостью

§ 98. Общая характеристика	541
§ 99. Сегнетоэлектрические конденсаторы	543
§ 100. Полупроводниковые конденсаторы	549

Приложение	555
-----------------------------	-----

Литература	558
-----------------------------	-----

РЕННЕ ВЛАДИМИР ТИХОНОВИЧ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Редактор М. Н. Суровцева
Художественный редактор Г. А. Гудков
Технический редактор О. С. Житникова
Корректор Л. С. Абрамсон

Сдано в производство 31/VII 1968 г. Подписано
к печати 15/XI 1968 г. М44463. Печ. л. 37.
Уч.-изд. л. 37. Бум. л. 18,5. Бумага типо-
графская № 3 60×90¹/₁₆. Тираж 15 000. Цена
2 руб. Заказ 1945.

Ленинградское отделение издательства
«Энергия», Марсово поле, 1.

Ордена Трудового Красного Знамени Ленин-
градская типография № 1 «Печатный Двор»
имени А. М. Горького Главполиграфпрома Ко-
митета по печати при Совете Министров
СССР, г. Ленинград, Гатчинская ул., 26.